



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden korkeakoulu
Energiatekniikan laitos

Jesse Paakkari

Vaikutusmahdollisuudet toimistorakennuksen hiilijalanjälkeen energiatehokkaan suunnittelun keinoin

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 15.5.2013

Valvoja: Professori Risto Lahdelma

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Timo Husu

AALTO-YLIOPISTO TEKNIIKAN KORKEAKOULUT PL 12100, 00076 Aalto http://www.aalto.fi		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Jesse Paakkari			
Työn nimi: Vaikutusmahdollisuudet toimistorakennuksen hiilijalanjälkeen energiatehokkaan suunnittelun keinoin			
Korkeakoulu: Insinööritieteiden korkeakoulu			
Laitos: Energiatekniikan laitos			
Professori: Energialous ja voimalaitostekniikka		Koodi: Ene-59	
Työn valvoja: Professori Risto Lahdelma			
Työn ohjaaja: Diplomi-insinööri Timo Husu			
<p> Toimistorakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki muodostuu lukuisista erilaisista asioista. Suurimman osan tästä muodostaa rakennuksen energiankäyttö. Energiankäyttö toimistorakennuksissa koostuu lämmityksestä, jäähdytyksestä ja laitteiden sähkönkulutuksesta. Erilaisilla suunnitteluratkaisuilla voidaan vaikuttaa eri energiankäytön osa-alueisiin. Toimistorakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen vaikuttaminen on sitä helpompaa, mitä aikaisemmassa vaiheessa rakennushanketta se tehdään. </p> <p> Tässä työssä tutustuttiin niihin keinoihin, joilla toimistorakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeä voidaan pyrkiä vähentämään. Työssä tutkittiin laskennallisesti useiden erilaisten suunnitteluratkaisujen vaikutusta esimerkkirakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen. Esimerkkirakennuksena toimi Granlund Oy:n Helsingin Malmilla sijaitseva pääkonttori. Energialaskenta suoritettiin Granlund Oy:n kehittämällä RIUSKA ohjelmalla ja rakennusvaiheen hiilijalanjäljen laskenta VTT:n ja Pöyryn kehittämällä ILMARI laskurilla. Referenssitapauksena käytettiin rakennusta vuonna 2013 voimassa olevien määräysten mukaisilla järjestelmillä. Referenssitapauksen tulosta verrattiin sitten tuloksiin seuraavista laskentatapauksista, joissa rakennuksen energiatehokkuutta oli aina jollain tavoin parannettu. Nämä laskentatapaukset olivat rakenteelliset parannukset, valaistustehon pienentäminen, tarpeenmukainen ilmanvaihto, useita parannuksia (yhdistettynä rakenteelliset parannukset, valaistustehon pienentäminen ja ilmanvaihdon SFP-luvun pienentäminen) sekä maalämmön ja -kylmän käyttö. </p> <p> Kaikissa laskentatapauksissa energiankäyttö muodosti yli 64 % rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljestä. Toiseksi suurimman osa-alueen muodostivat rakennustuotteiden valmistus ja kuljetukset työmaalle. Tämän osa-alueen osuus oli tapauksesta riippuen 18,5–21,6 %. Voidaan siis todeta, että rakennuksen hiilijalanjälkeen pystytään tehokkaimmin vaikuttamaan juuri rakennuksen energiatehokkuutta parantamalla. </p> <p> Eniten rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeä saatiin pienennettyä käyttämällä maalämpöä ja -kylmää kaukolämpöalueen ulkopuolella sijaitsevalle rakennukselle. Näin saavutettu hiilijalanjälki oli 14,2 % pienempi kuin referenssitapauksessa. Maalämpöpumpun käyttäminen vähensi lämmityksen aiheuttamaa ostoenergiankulutusta jopa 61 %. On kuitenkin huomioitava, että kaukolämpöalueella sijaitsevan rakennuksen kohdalla parempiin tuloksiin päästään käyttämällä kaukolämpöä. Yhdistämällä useita parannuksia saatiin elinkaaren hiilijalanjälkeä vähennettyä 12,4 %. Rakenteellisilla parannuksilla sekä valaistustehon pienentämisellä saatiin molemmilla aikaan 6,6 %:n pienennys hiilijalanjälkeen. Heikon tulos (4,5 % vähennys hiilijalanjälkeen) tuli valaistustehoa pienentämällä. </p> <p> Minkään laskentatapauksen aiheuttama pienennys hiilijalanjälkeen ei ollut merkityksellinen. Yksittäisillään energiatehokkuuteen vaikuttavilla toimenpiteillä voidaan siis vaikuttaa jonkin verran rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen. Kuitenkin jos halutaan suuresti pienentää hiilijalanjälkeä, on kiinnitettävä huomiota rakennuksen lämmitysmuotoon tai yhdistettävä useita energiatehokkuuteen vaikuttavia toimenpiteitä. Todellisuudessa jokainen toimistorakennus on kuitenkin yksilöllinen, ja tässä rakennuksessa toimivat keinot eivät välttämättä ole yhtä tehokkaita kaikissa toimistorakennuksissa. </p>			
Päivämäärä: 15.5.2013		Kieli: suomi	
		Sivumäärä: 93 + 8	
Avainsanat: Toimistorakennus, hiilijalanjälki, elinkaari, energiatehokkuus			

AALTO UNIVERSITY SCHOOLS OF TECHNOLOGY PO Box 12100, FI-00076 AALTO http://www.aalto.fi		ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	
Author: Jesse Paakkari			
Title: Affecting the carbon footprint of an office building with energy efficient design			
School: School of Engineering			
Department: Department of Energy Technology			
Professorship: Energy Economics and Power Plant Engineering		Code: Ene-59	
Supervisor: Professor Risto Lahdelma			
Instructor: Timo Husu, M.Sc. (Tech.)			
<p>The carbon footprint of an office building is a sum of many different aspects. The most important aspect is generally the energy use. Energy use in office buildings consists of heating, cooling and electricity use. Different fields of energy use can be affected by many different design solutions. Affecting the carbon footprint of an office building is easier at the beginning of the building project and gets more difficult towards the end of the project.</p> <p>In this thesis, I studied the ways of reducing the life cycle carbon footprint of an office building. I studied the effects of different design solutions on the carbon footprint of an example building. The example building was the headquarters of Granlund Ltd. in Malmi, Helsinki. The energy simulations were executed with RIUSKA program developed by Granlund Ltd. and the carbon footprint from the construction phase was computed with ILMARI calculation tool developed by VTT and Pöyry Ltd. The reference case was the building with the systems according to the national building code of Finland. The results from this case were then compared to the results from the following cases in which the energy efficiency of the building was improved in some way. The cases following the reference case were structural improvements, lowering the energy intensity of the lighting, variable air volume in ventilation, several energy efficiency improvements combined (structural improvements, lower energy intensity of lighting and lower specific fan power in ventilation) and harnessing geothermal heat for heating and cooling.</p> <p>In every case the energy use was responsible for over 64 % of the life cycle carbon footprint of the building. The second biggest sector was manufacturing and transporting of the materials and products. The share of this sector was 18.5–21.6 % depending on the case. Thus it can be established that affecting the carbon footprint of an office building is most effectively done by improving the energy efficiency of the building.</p> <p>The biggest reduction in the carbon footprint was achieved by harnessing geothermal heat for heating and cooling and assuming that the building is located outside district heating area. The reduction in this case was 14.2 %. By using the geothermal heat, the energy used for heating was reduced by 61 %. However when the building is located in district heating area, smaller carbon footprint is achieved by using district heating. By combining several improvements in energy efficiency, the carbon footprint of the building was reduced by 12.4 %. Structural improvements and variable air volume in ventilation resulted in same reduction of carbon footprint, 6.6 % compared to the reference case. Lowering the energy intensity of lighting resulted in lowest reduction of carbon footprint, 4.5 %.</p> <p>In all cases the carbon footprint was reduced at least several percent. It can be concluded that even single improvement in energy efficiency can result in moderate reductions in carbon footprint of the building. However if the carbon footprint must be considerably reduced, one must consider the heat source of the building or combine several improvements in the energy efficiency of the building. In reality each office building is individual and the measures that are effective in this particular building aren't necessarily effective in all office buildings.</p>			
Date: 15.5.2013		Language: Finnish	
		Number of pages: 93 + 8	
Keywords: Office building, carbon footprint, life cycle, energy efficiency			

Alkusanat

Sain syksyllä 2012 tiedon Santeri Kondakovilta, että yritys haluaa teettää diplomityön liittyen toimistorakennusten hiilijalanjäljen vähentämiseen. Koin aiheen kiinnostavaksi ja tartuin siihen välittömästi.

Aluksi etenkin työn teoriaosuuden aihepiiri tuntui olevan jopa liian laaja. Työn edetessä rajaukset kuitenkin tarkentuivat ja työn rakenne muodostui lopulta johdonmukaiseksi ja selkeäksi. Laskentaosuus tuntui aluksi hankalalta toteuttaa käytännössä. Näistäkin haasteista kuitenkin selvittiin loppujen lopuksi kunnialla.

Haluan kiittää Granlund Oy:tä työn mahdollistamisesta ja avuliaasta työilmapiiristä. Etenkin haluan kiittää työni ohjaajaa Timo Husua asiantuntemuksesta ja rakentavasta palautteesta koko työni ajan. Haluan kiittää lisäksi Nina Peltolaa avustamisesta työn laskentavaiheessa, Santeri Kondakovia työn mahdollistamisesta sekä hyödyllisistä vinkeistä koko työn ajalta sekä Tuomas Lainetta työn rahoituksen järjestämisestä. Kiitokset kuuluvat myös professori Risto Lahdelmalle työni asianmukaisesta valvomisesta.

Suuret kiitokset kuuluvat myös perheelleni ja ystävilleni, jotka ovat pelkällä olemassaolollaan antaneet minulle voimia tämänkin haasteen selättämiseksi. Erityisesti haluan kiittää tyttöystävääni Katjaa jatkuvasta tuesta, joka on aina auttanut minua ponnistelemaan eteenpäin.

Espoossa 15.5.2013



Jesse Paakkari

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
1.1	Työn tausta	1
1.2	Työn tavoite ja rakenne	1
2	Rakennusten ympäristötehokkuus	3
2.1	Rakennuksen energiatase	3
2.2	Lämmitys.....	4
2.2.1	Rakennuksen vaippa (pl. ikkunat)	4
2.2.2	Ikkunat	5
2.2.3	Lämmitysmuoto	6
2.2.4	Lämmin käyttövesi	10
2.2.5	Ilmanvaihto	11
2.3	Sähkönkulutus	12
2.3.1	Ilmanvaihdon sähkönkäyttö.....	12
2.3.2	Valaistus.....	13
2.3.3	Toimistolaitteet	13
2.3.4	Aurinkosähkö.....	14
2.4	Jäähdytys	15
2.4.1	Jäähdytysmuoto	15
2.4.2	Jäähdytystarve.....	18
3	Energiatehokkuuden mittarit ja indikaattorit	19
3.1	Viranomaisten käyttämät indikaattorit Suomessa	19
3.1.1	E-luku.....	19
3.1.2	Energiatodistus (ET-luku).....	22
3.2	Yksityisen sektorin käyttämät mittarit (Värkki-projekti).....	23
3.2.1	Energiankulutus	24
3.2.2	Käytön hiilijalanjälki	25
3.2.3	Pohjateho	26
3.2.4	Sisäympäristöön tyytyväiset	27
3.2.5	Kiinteistöpassi.....	28
4	Rakentamisen suunnitteluprosessi	29
4.1	Suunnitteluprosessin vaiheet.....	29
4.2	Suunnitteluprosessin päätöksentekoa ohjaavat seikat	32
4.2.1	Rakennusmääräykset	32
4.2.2	Sisäilmastoluokitus	33
4.3	Suunnittelualat.....	35
4.4	Elinkaarisuunnittelu	36
5	Suunnitteluratkaisujen määrittely	39
5.1	Rakennerratkaisut	39
5.1.1	Uudet lämpöeristeet	39
5.1.2	Faasimuutosmateriaalit	40
5.2	Ilmanvaihto	42
5.2.1	Lämmöntalteenotto	42
5.2.2	Tarpeenmukainen ilmanvaihto	44
5.3	Veden kulutuksen pienentäminen	46
5.4	Valaisinratkaisut.....	46
5.5	Maalämmön ja -kylmän hyödyntäminen	48
5.6	Jäähdytystarpeen vähentäminen.....	50

6	Hiilijalanjäljen laskennan kuvaus	53
6.1	Rakennusvaihe	55
6.2	Käyttövaihe	56
6.3	Purkaminen	58
6.4	Elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset	59
6.5	Varhaisen vaiheen laskennan yksinkertaistaminen	60
7	Laskennat	63
7.1	Rakennuksen lähtötiedot	63
7.1.1	Geometria.....	63
7.1.2	Perustukset	65
7.1.3	Säätiedot.....	65
7.1.4	Veden kulutus	65
7.2	Laskennan suorittaminen	65
7.3	Referenssitapaus (tapaus 1).....	67
7.3.1	Sisäiset lämpökuormat	67
7.3.2	Rakennuksen vaippa	68
7.3.3	Ilmanvaihto	68
7.3.4	Lämmitys	69
7.3.5	Jäähdytys.....	69
7.3.6	Tulokset	69
7.4	Rakenteelliset parannukset (tapaus 2).....	71
7.5	Valaistustehon pienentäminen (tapaus 3).....	73
7.6	Tarpeenmukainen ilmanvaihto (tapaus 4).....	74
7.7	Useita parannuksia energiatehokkuuteen (tapaus 5).....	75
7.8	Maalämpöpumpun käyttö referenssitapauksessa (tapaus 6)	77
7.9	Johtopäätökset	80
8	Yhteenveto	84
9	Lähteet	87

Merkinnät

P	teho [W]
$Q_{\text{lämmitys}}$	ET-luvun laskennassa käytetty rakennuksen tarvitsema vuotuinen lämmitysenergia
\dot{V}	tilavuusvirta [m^3/s]
n_{50}	ilmanvuotoluku 50 Pa:n paine-erolla [1/h]
η	hyötysuhde yleensä
η_t	lämmöntalteenoton lämpötilahyötysuhde
η_a	lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde
Δp	painehäviö [Pa]

Lyhenteet

COP	Coefficient Of Performance (lämpöpumpun lämpökerroin)
EuW	End of Waste
GHG Protocol	Greenhouse Gas Protocol
GWP	Global-warming potential (ilmastoa lämmittävä vaikutus)
LCA	Life Cycle Assessment (elinkaariarviointi)
LCC	Life Cycle Cost (elinkaarikustannukset)
LTO	Lämmöntalteenotto (ilmanvaihto)
MET	Metabolinen ekvivalentti (58 W/m^2)
MLP	Maalämpöpumppu
SFP	Specific Fan Power (ilmanvaihdon ominaissähköteho)
SRMK	Suomen rakentamismääräyskokoelma
TATE	Talotekniikka
VJK	Vedenjäähdytyskone

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Suomi on sitoutunut useisiin haastaviin tavoitteisiin kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi sekä kansallisella että EU-tasolla. Taustalla on EU:n pitkän aikavälin tavoite kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi vähintään 80 %:lla vuoden 1990 tasosta vuoteen 2050 mennessä. Yksi tämän tavoitteen välitavoitteista on ns. 20-20-20-tavoite. Tämä tavoite koostuu kolmesta osatavoitteesta, joiden saavuttamisen takaraja on vuosi 2020: 20 %:n vähennys kasvihuonekaasupäästöissä vuoden 1990 tasosta; uusiutuvan energian osuuden nostaminen 20 %:iin; 20 %:n parannus energiatehokkuudessa. Tavoitteiden saavuttamiseksi energiatehokkuutta on parannettava ja käyttötottumuksia on muutettava merkittävästi kaikilla yhteiskunnan sektoreilla. (European Commission 2012a)

Rakennusten osuus energian loppukäytöstä on yli 40 % ja kasvihuonekaasupäästöistä lähes 40 % (Ympäristöministeriö et al. 2010, s. 17). Rakennusten energiatehokkuudella on siis hyvin merkittävä vaikutus tuotettuihin kasvihuonekaasupäästöihin, minkä vuoksi rakentamisen säädösohjausta onkin tiukennettu asteittain 2000-luvulla koko EU:n tasolla. Viimeisin rakennusmääräysten päivitys tuli Suomessa voimaan kesällä 2012. Viimeisimmässä päivityksessä siirryttiin ostoenergian muodot huomioon ottavaan kokonaisenergiatarkasteluun. Vanhoihin määräyksiin verrattuna vaaditaan noin 20 %:n keskimääräinen parannus energiatehokkuudessa (Ympäristöministeriö 2011a). Tämän lisäksi EU:n energiatehokkuusdirektiivi edellyttää, että kaikki uudet rakennukset ovat 2021 alkaen lähes nollaenergiataloja (julkiset rakennukset jo vuodesta 2019 alkaen) (Ympäristöministeriö 2011b). Direktiiveihin ja määräyksiin pohjautuvien tavoitteiden lisäksi on kehitetty useita vapaaehtoisia vihreiden kiinteistöjen sertifiointijärjestelmiä, kuten amerikkalainen LEED, brittiläinen BREEAM sekä suomalainen PromisE.

Uudet energiamääräykset mahdollistavat kokonaisenergiatarkastelunsa vuoksi laajalaisemman suunnitteluratkaisujen käytön energiatehokkuuden tavoitetason saavuttamisessa. Näin voidaan valita käytettävät suunnitteluratkaisut niin, että rakennuksen elinkaarikustannukset eivät nouse liian suuriksi.

1.2 Työn tavoite ja rakenne

Työn päätavoite on selvittää miten ja kuinka paljon energiatehokkaalla suunnittelulla voidaan vaikuttaa toimistorakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen. Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki muodostuu energiankäytön ohella mm. huolto-ohjelmasta ja rakentamisessa käytetyistä materiaaleista. Tässä työssä keskitytään kuitenkin lähinnä rakennuksen energiankäyttöön vaikuttaviin suunnitteluratkaisuihin, sillä energiankäyttö edustaa tavallisesti yli 60 % rakennusten elinkaaren hiilijalanjäljestä (Pasanen et al. 2011, s. 21).

Työn toisessa luvussa ”Rakennusten ympäristötehokkuus” tarkastellaan miten ja kuinka paljon rakennuksen energiankäytön eri osa-alueet vaikuttavat rakennusten ympäristötehokkuuteen ja miten näihin asioihin voidaan vaikuttaa. Luvussa käsitellään erikseen lämmitysenergian, jäähdytysenergian ja sähkön kulutukseen vaikuttavia seikkoja.

Seuraavassa luvussa ”Energiatehokkuuden mittarit ja indikaattorit” käsitellään ja vertaillaan erilaisia keinoja kuvata rakennuksen energiatehokkuutta. Pyritään arvioimaan erilaisten mittareiden ja indikaattoreiden mielekkyyttä ja selkeyttä. Luvussa käsitellään erikseen lainsäädännössä esiintyviä mittareita ja yksityisten toimijoiden käyttämiä mittareita.

Neljännessä luvussa ”Suunnitteluprosessi” käsitellään asioita, jotka ohjaavat päätöksentekoa suunnitteluprosessissa, kuvataan suunnitteluprosessin eri vaiheet ja käsitellään eri suunnittelualojen vastuualueita sekä vaikutusmahdollisuuksia rakennuksen energiatehokkuuteen ja hiilijalanjälkeen.

Luvussa 5 ”Suunnitteluratkaisujen määrittely” käsitellään niitä suunnitteluratkaisuja, joilla rakennuksen hiilijalanjälkeen voidaan vaikuttaa. Lisäksi arvioidaan kyseisten ratkaisujen teknistä ja taloudellista toteutettavuutta.

Luvussa 6 ”Hiilijalanjäljen laskennan kuvaus” valitaan työn laskentaosiossa käytettävä menetelmä hiilijalanjäljen laskemista varten ja kuvataan sen eteneminen. Laskentamenetelmäksi valitaan kansainvälisiin standardeihin perustuva ja mahdollisen yksiselitteinen menetelmä. Laskentamenetelmä tulee kuvata riittävän yksityiskohtaisesti, jotta hiilijalanjälki voidaan laskea ilman liiallista tulkinnanvaraisuutta. Etenkin laskennan taserajat on määriteltävä tarkkaan.

Luvussa 7 ”Laskennat” kuvataan laskentatapaukset sekä lasketaan niille hiilijalanjäljet luvussa 6 kuvatulla menetelmällä. Laskentaosion pohjana toimii referenssitapaus, jossa rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki on laskettu nykyiset rakennusmääräykset täyttävälle rakennukselle. Referenssitapauksen tulosta verrataan sitten muihin laskentatapauksiin, joissa rakennuksen energiatehokkuutta on aina jollain lailla parannettu. Näin voidaan päätellä, mitkä keinot ovat tehokkaita rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen vähentämisessä.

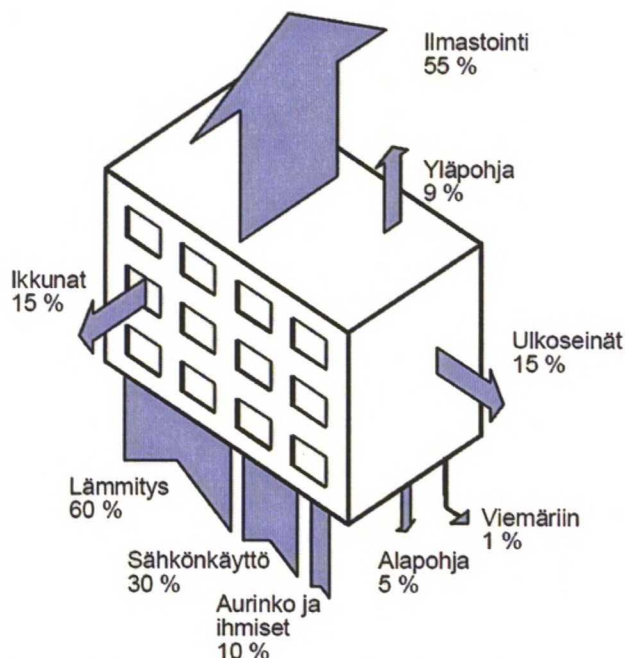
2 Rakennusten ympäristötehokkuus

Rakennusten ympäristötehokkuudella tarkoitetaan rakennuksen kykyä tuottaa hyödykkeitä käyttäjilleen niin, että tästä toiminnasta koituu mahdollisimman vähän haittaa ympäristölle. Hyödykkeillä tarkoitetaan kaikkia asioita, joista on rakennuksen käyttäjälle jonkinlaista hyötyä. Hyödyke voi siis tarkoittaa esimerkiksi työpisteiden määrää toimistorakennuksessa, laadukasta sisäilmastoa tai vaikkapa rakennuksen muuntojoustavuutta. Ympäristötehokas rakennus pystyy siis tuottamaan käyttäjilleen suuren määrän hyödykkeitä kuormittamalla ympäristöä vain maltillisesti. Rakennuksen ympäristötehokkuutta voidaan siis parantaa paitsi vähentämällä siitä aiheutuvaa kuormitusta ympäristölle myös lisäämällä siitä käyttäjälle koituvaa hyötyä, niin että ympäristölle aiheutuva kuormitus pysyy samana tai lisääntyä vain nimellisesti.

Rakennuksen energiankäyttö muodostaa suurimman osan lähes kaikkien rakennusten hiilijalanjäljestä. Toimistorakennuksissa energiankäytön osuus rakennuksen hiilijalanjäljestä on yleensä 60–70 % (Airaksinen & Matilainen 2011). Tämän vuoksi tässä työssä rakennusten ympäristötehokkuuteen vaikuttavista asioista suurimman huomion saa energiatehokkuus. Ympäristötehokkaan rakennuksen suunnittelu vaatii energiatehokkuuden huomioimista kaikissa suunnittelun, rakentamisen ja käytön vaiheissa.

Rakennuksen energiankäyttö muodostuu tilojen lämmityksestä, lämpimän käyttöveden lämmityksestä, jäähdytyksestä, laitesähköstä ja valaistuksesta. Laitesähköstä on vielä mielekästä erottaa ilmanvaihdon sähkönkäyttö, sillä se muodostaa jopa noin 10 % koko toimistorakennuksen energiankäytöstä (Airaksinen & Matilainen 2011). Tässä luvussa tarkastellaan rakennuksen energiankäytön osa-alueiden merkitystä ympäristötehokkuuden kannalta sekä osin sitä miten rakennuksen energiatehokkuutta voidaan parantaa.

2.1 Rakennuksen energiatase



Kuva 1 Toimistorakennuksen energiavirrat (Ylinen 2010)

Rakennuksen energiatase sisältää rakennukseen tulevat ja siitä poistuvat energiavirrat. Energiaa tuodaan rakennuksiin teknisillä järjestelmillä (lämmitys ja sähkö). Rakennukseen tuotu sähkö muuttuu yleensä lopulta lämmöksi. Lisäksi energiaa tulee rakennuksiin auringon säteilyn ja ihmisten lämmöntuoton vuoksi. Rakennuksesta poistuva energia on yleensä kokonaisuudessaan lämpöä (lämpöhäviöt). Poikkeuksen tähän muodostavat rakennukset, jotka tuottavat itse sähköä tai lämpöä ja syöttävät sitä takaisin sähkö- tai kaukolämpöverkkoon. Lämpöenergiaa poistuu rakennuksesta johtumalla rakenteiden ja ikkunoiden lävitse sekä poistoilman ja jäteveden mukana.

Stationääritilanteessa rakennukseen tulevat ja sieltä poistuvat energiavirrat ovat yhtä suuret. Karkean tason energialaskennassa voidaan olettaa, että rakennuksessa vallitsee kullakin ajanhetkellä stationääritilanne, jolloin laskennan suorittaminen onnistuu melko yksinkertaisesti. Jos laskennassa ei oleteta stationääritilannetta, puhutaan dynaamisesta energialaskennasta. Dynaamisella energialaskennalla saadaan tarkempia tuloksia, mutta se on huomattavasti monimutkaisempi laskentatapa ja vaatii soveltuvaa tietokoneohjelmistoa sekä asiantuntemusta käyttäjältään.

2.2 Lämmitys

2.2.1 Rakennuksen vaippa (pl. ikkunat)

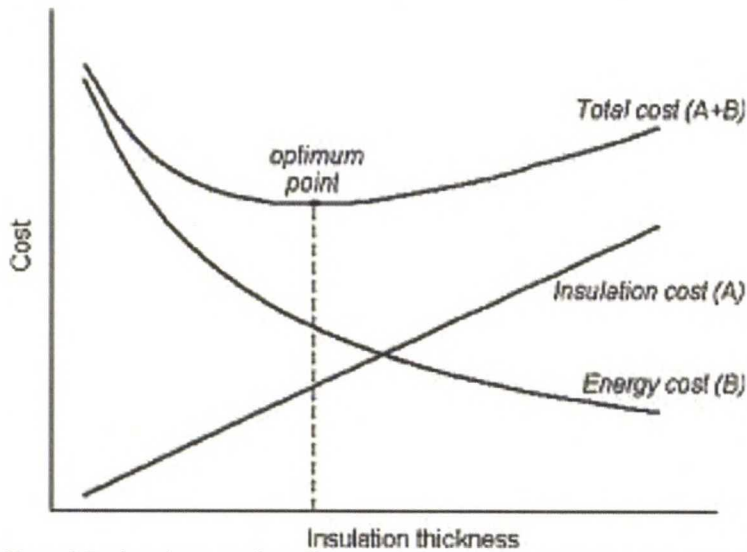
Tyypillisesti rakenteiden (pl. ikkunat) lämpöhäviöt muodostavat noin 30 % koko rakennuksen lämpöhäviöistä. Rakenteiden lämpöhäviöt aiheutuvat lämmön johtumisesta, konvektiosta, lämpösäteilystä sekä vuodoista rakenteiden läpi. Ulkoseinät muodostavat tavanomaisen toimistorakennuksen lämpöhäviöistä noin 15 %, alapohja 5 % ja yläpohja 9 %. (Ylinen 2010)

Rakenteista aiheutuvia lämpöhäviöitä voidaan pyrkiä rajoittamaan valitsemalla tehokkaita lämpöeristeitä sekä kasvattamalla eristyspaksuutta. Lämpöeristyksen ympäristötehokkuuteen vaikuttavat paitsi rakenteen paremman U-arvon avulla saavutettu lämpöenergian säästö, myös eristeen valmistamiseen ja asentamiseen käytetty energia ja materiaalit. Esimerkiksi yhden eristekilogramman valmistamisen energiankulutus aiheuttaa kivivillalla noin 0,39 kg:n CO₂-ekvivalentit päästöt, kun pursotetulla polystyreenillä (XPS) vastaava luku on 1,18 kg (Papadopoulos & Giama 2007). Kivivillan ja XPS:n lämmönjohtavuudet vastaavasti ovat noin 0,04 W/mK ja 0,03 W/mK (Paakkari 2011).

Mineraalivilla (lasi- ja kivivilla) on tällä hetkellä käytetyin lämpöeriste suomalaisessa rakentamisessa. Vaikka mineraalivilla onkin melko tehokas lämpöeriste, vielä parempi rakenteen U-arvo voidaan saavuttaa käyttämällä esimerkiksi polyuretaania tai vaikkapa tyhjiöeristyspaneeleja. Polyuretaanin, tyhjiöeristyspaneelien ja muiden tehokkaampien lämpöeristeiden käyttöä rajoittaa kuitenkin ainakin toistaiseksi niiden korkeampi hinta. Käyttämällä tehokkaita lämpöeristeitä voidaan kuitenkin saavuttaa hyvä rakenteen U-arvo joutumatta kasvattamaan rakenteen paksuutta liian suureksi.

Rakenteen U-arvoa voidaan parantaa myös kasvattamalla eristepaksuutta. Tällöin ongelmaksi voi kuitenkin muodostua liiallinen rakenteen paksuus (pienempi nettoala) ja eristemateriaalin hinta. Rakenteiden kosteustekniseen toimintaan tulee myös kiinnittää huomiota etenkin eristepaksuutta kasvattaessa. Lämpötilan rakenteen sisällä ei tule missään vaiheessa pudota alle kastepisteen. Eristepaksuutta kasvattamalla saadaan aikaan

säästöjä lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutuksessa, mutta samalla rakenteen hinta kasvaa (kts. Kuva 2). Sen vuoksi onkin tärkeää löytää rakenteelle optimaalinen eristyspaksuus, jossa prioriteetista riippuen joko rakenteen elinkaarikustannukset tai ympäristövaikutukset ovat minimissään. Optimaalinen eristepaksuus riippuu mm. seuraavista seikoista: rakennustyyppi, rakennuksen käyttötarkoitus, rakennuksen suunta, rakennusmateriaalit, ilmasto-olot, eristemateriaali, lämmitysenergian muoto ja hinta sekä ilmanvaihdon lämmöntalteenoton tyyppi ja hyötysuhde. (Kaynakli 2012)



Kuva 2 Periaatekuva optimaalisesta eristepaksuudesta elinkaarikustannusten kannalta (Kaynakli 2012).

Ilmavuodot voivat aiheuttaa merkittävän osan rakennuksen lämmitystarpeesta. Niiden suhteellinen osuus kasvaa hyvin eristetyssä rakennuksessa. Ilmavuotoja esiintyy tyypillisesti etenkin rakennuksen ulkovaipan reunoilla. Rakenteiden ilmanvuotoa mitataan yleensä n_{50} -luvulla, joka kertoo kuinka monta kertaa rakennuksen tilavuus vaihtuu tunnissa, kun ulko- ja sisäilman välillä on 50 Pa:n paine-ero. Suomen tämänhetkisen rakennuskannan ilmanvuotoluku vaihtelee tavallisesti välillä $n_{50} = 1,5\text{--}4$. Nyrkkisääntö vuotuisen ilmavuodon määrälle on n_{50} -luku jaettuna luvulla 20 (Jokisalo et al. 2009). Erinomaiseen ilmanpitävyyteen (ilmanvuotoluku $n_{50} \leq 0,5$ l/h) voidaan päästä lähes kaikilla rakennusmateriaaleilla, jos asiaan kiinnitetään tarpeeksi huomiota sekä suunnittelu- että rakennusvaiheessa. Rakenteiden läpi tapahtuvaa ilmavuotoa pystytään vähentämään myös tiiviillä lämpöeristämällä. Esimerkiksi polyuretaanivaahtoa tai muita ruiskutettavia lämpöeristeitä käyttämällä voidaan parantaa rakenteen ilmatiiveyttä. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2012)

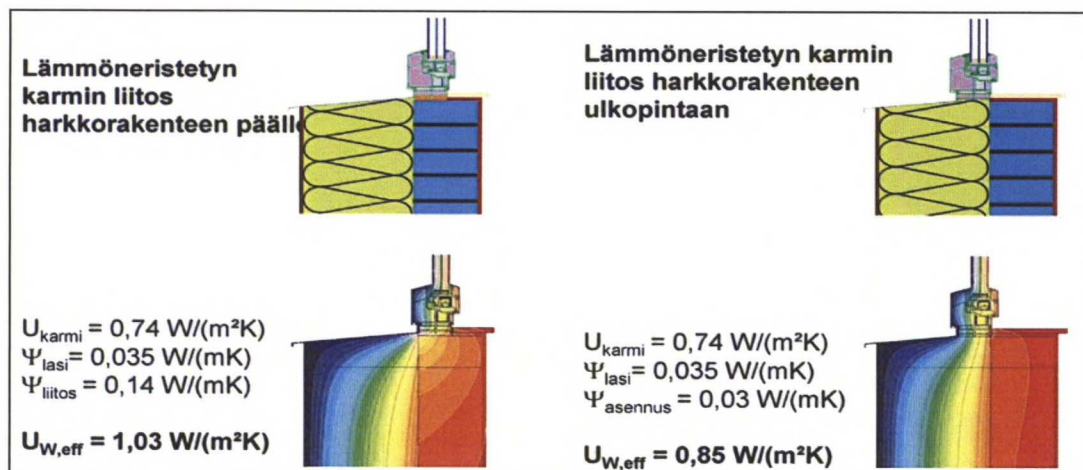
2.2.2 Ikkunat

Ikkunat ovat rakennuksen vaipan heikoimmin lämpöä eristäviä osia, minkä vuoksi ne aiheuttavat suhteellisesti merkittävän osan rakennuksen lämpöhäviöistä. Ikkunat muodostavat noin 15 % toimistorakennuksen lämpöhäviöistä (Ylinen 2010). Ikkunat vaikuttavat rakennuksen nettolämpöhäviöihin myös päästämällä auringonvaloa lävitseen ja siten vähentämällä lämmityksen tarvetta. Tämä kuitenkin vuorostaan lisää rakennuksen jäähdytystarvetta kesäisin. Ikkunat myös vähentävät valaistuksen tarvetta päästämällä luonnonvaloa sisään ja vähentävät näin sähkön kulutusta. Siksi ikkunoita suunniteltaessa tulee huomioida aina niiden vaikutus kokonaisenergian kulutukseen. Ikkunoiden aiheuttamiin kokonaisenergiavaikutuksiin vaikuttavat mm. ikkunoiden pinta-ala, U-arvo,

ilmatiiveys, suuntaus (etelään suunnatut ikkunat aiheuttavat eniten lämpökuormia) ja aurinkosuojaus. Ikkunoiden vaikutusta sähkö- ja jäähdytysenergian kulutukseen käsitellään omilla kappaleissaan.

Ikkunan U-arvoon vaikuttavat lasien emissiviteetti, lasien välinen etäisyys, käytetty täytekaasu, välilista ja puitemateriaali. Yksinkertaisin tapa parantaa ikkunan lasiosan U-arvoa on lisätä lasien määrää. Lasien lisääminen yli neljän ei kuitenkaan ole järkevää, sillä näin saavutettava hyöty jää hyvin pieneksi. Ikkunan lasiosan U-arvoa voidaan myös pienentää käyttämällä sopivasti pinnoitettua lasia. Selektiivisen pinnoituksen tehtävä yleensä on heijastaa sisältäpäin tuleva matalaenerginen lämpösäteily takaisin, ja samalla päästää ulkoapäin tuleva korkeaenerginen auringonvalo läpi. Mitä pienempi emissiviteetti ikkunalasilla on, sitä paremmin se eristää lämpöä. Selektiivilasien täytekaasuina käytetään yleensä ilmaa, argonia tai kryptonaa. Selektiivilasien U-arvo on tyypillisesti 0,5–1,3 W/m²K. (Heimonen et al. 1999)

Ikkunat aiheuttavat myös merkittävän osuuden rakennuksen ilmavuodoista. Ilmavuotoja esiintyy etenkin ikkunoiden ja ulkovaipan liitoksissa. Huono liitos ulkovaipan kanssa vähentää ikkunan tehollista U-arvoa lisäämällä ilmavuodon määrää. Nämä liitokset ovatkin tärkeä tiivistää huolella ja liittää tiiviisti karmirakenteisiin. Tiivistettäessä on tärkeä pitää huoli, ettei tiivistettävälle pinnoille jää pölyä ja että tilan lämpötila tiivistettäessä on riittävän korkea (yli 0 °C). Myös ikkunan sijoituspaikka rakenteen syvyys suunnassa vaikuttaa ikkunan ilmavuotoihin. Ikkuna tulisi aina sijoittaa ulkovaipan rakenteen eristetilan kohdalle eikä kantavan sisäkuoren päälle. Ikkunoiden ilmavuotojen minimointi edellyttää detaljien tarkkaa suunnittelua ja toteutusta. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2012)



Kuva 3 Ikkunoiden rakenteen syvyysuuntaisen sijoituksen vaikutus U-arvoon (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2012).

2.2.3 Lämmitysmuoto

Lämmitysmuodon vaikutus rakennuksen ympäristötehokkuuteen on erittäin merkittävä. Ympäristötehokkuuden lisäksi rakennuksen lämmitysmuodon valinnalla on muitakin merkittäviä ja kauaskantoisia vaikutuksia. Lämmitysmuoto vaikuttaa suuresti esimerkiksi energian hintaan, lämmöntuotannon hyötysuhteeseen, tilantarpeeseen rakennuksen sisällä ja ulkopuolella, investointikustannuksiin ja huollon tarpeeseen. Näiden syiden

vuoksi lämmitysmuodon valinta on yksi tärkeimmistä rakennusprosessin aikaisista suunnittelupäätöksistä.

Kaukolämpö

Suomen ylivoimaisesti käytetyin lämmitysmuoto on kaukolämpö. Sen energiaisuus Suomen lämmitysmarkkinoista on noin 46 %. Kaukolämpö on erityisen suosittu lämmitysmuoto kaupungeissa. Kaukolämpö on eritoten Suomessa melko ympäristötehokas lämmitysmuoto, sillä lähes 80 % kaukolämmöstä tuotetaan sähkön ja lämmön yhteistuotantona, teollisuuden ylijäämlämpönä tai kaatopaikkojen biokaasujen poltolla. Etelä-Suomessa kaukolämmön energialähteenä käytetään tyypillisesti maakaasua, mikä johtuu etelään rakennetusta maakaasuverkostosta. Rannikkoalueilla käytetään myös kivihiiltä ja öljyä. Tämä johtuu siitä, että kivihiili ja öljy tuodaan maahan laivoilla, eikä sitä ole taloudellisesti kannattavaa kuljettaa pitkiä matkoja. Pohjois-Suomessa kaukolämmön tuotantoon käytetään lähinnä puuta ja turvetta, mikä johtuu pohjoisen runsaista metsä- ja suovarannoista. Uusiutuvien energialähteiden kuten puun ja biokaasun osuus kasvaa kokoajan. Nostamalla uusiutuvien energianlähteiden osuutta kaukolämmön tuotannosta, voidaan saavuttaa merkittäviä kasvihuonepäästövähennyksiä (Snäkin 2000). Vuosina 2000–2008 kaukolämmön keskimääräinen hiilijalanjälki Suomessa oli 216 g CO₂ ekv/kWh (Keto 2010). Kaukolämmön E-luvun laskentaan käytetty kerroin Suomen rakentamismääräyskokoelma D3:ssa on 0,7 (Sähkölle vastaava luku on 1,7) (Ympäristöministeriö 2012). Kaukolämmön suosio Suomessa perustuu ympäristötehokkuuden lisäksi helppouteen (lämmöntuottaja vastaa järjestelmän toimivuudesta), pienen tilantarpeeseen, hyvään hyötysuhteeseen ja kohtuulliseen energian hintaan. Toisaalta kaukolämpöä ei ole järkevää rakentaa harvaan asutulle alueelle, koska tällöin putkiston lämpöhäviöt ja investointikustannukset kasvaisivat liian suureksi. Kaukolämmön käyttöä rajoittavat myös joissakin tapauksissa korkeat liittymis-, asennus- ja laitteistokustannukset. (Linden & Peltola-Ojala 2010)

Sähkö

Sähkölämmitys on Suomen toiseksi suosituin rakennusten lämmitysmuoto. Sen energiaisuus lämmitysmarkkinoista on noin 20 % (Energiateollisuus 2013). Sähkölämmityksen melko suuri osuus johtuu siitä, että se on edelleenkin suosituin lämmitysmuoto uusissa pientaloissa. Suomessa on 1,1 miljoona omakotitaloa, joista jopa 42 % lämmitetään sähköllä (Heiskanen et al. 2011). Toimistorakennusten kohdalla vastaava osuus on vain 24 % (Tilastokeskus 2007). Myös sähkön hiilijalanjälki riippuu siitä onko sähkö tuotettu yhteistuotanto- vai erillislaitoksissa (lauhesähkö). Suomen keskimääräiselle sähkölle saadaan hiilijalanjäljeksi 224 g CO₂ ekv/kWh. Lämmitykseen käytettävän sähkön keskimääräinen hiilijalanjälki voi olla kuitenkin lähes kaksinkertaisesti suurempi kuin keskimääräisen sähkön hiilijalanjälki, johtuen tehohuippujen aikana käytettävistä lauhdevoimaloista (Heiskanen et al. 2011). Sähköenergian E-luvun laskentaan käytetty kerroin on SRMK D3:ssa 1,7, joka on kaikista energiamuodoista korkein (Ympäristöministeriö 2012). Sähkölämmityksen suosiota pientaloissa on ylläpitänyt mm. pienet investointikustannukset, hyvä hyötysuhde, nopea reagointi lämpötilan vaihteluihin ja valmis infrastruktuuri (Sähköverkot ovat lähes kaikkialla). Sähkölämmityksen heikkouksia ovat kuitenkin energian kalleus, suuremmat kasvihuonepäästöt ja suoran sähkölämmityksen tapauksessa lämmitysmuodon joustamattomuus (lämmitysmuodon vaihtaminen on tällöin työläs ja kallis prosessi). Kesällä 2012 voimaan tulleen viimeisimmän rakennusmääräysten päivityksen tarkoitus on vähentää sähkölämmityksen osuutta

pientaloissa. E-lukuvaatimus on melko vaikea täyttää, jos käyttää sähkölämmitystä ensisijaisena lämmönlähteenä.

Puu

Puulämmityksen energiaosuus Suomen lämmitysmarkkinoista on noin 13 % (Energiateollisuus 2013). Omakotitaloista puulla lämpiää 24 %, kun toimistorakennuksilla vastaava luku on alle 2 % (Heiskanen et al. 2011) (Tilastokeskus 2007). Rakennusten lämmittämiseen käytettävä puu on hake-, pelletti- tai halkomuodossa. Puu poltetaan kattilassa, joka on yleensä yhteydessä vesikiertoiseen patteri- tai lattialämmitysverkkoon. Lisäksi järjestelmässä on yleensä myös toinen lämmönlähde (esim. sähkö). Puun oletetaan usein olevan hiilineutraalia. Tätä perustellaan sillä, että kasvava puu sitoo saman CO₂-määrän kuin poltettava puu vapauttaa, jolloin nettovaikutus on ilmaston kannalta on nolla. Käytännössä puiden kaataminen kuitenkin vähentää aina jonkin verran luonnon hiilinieluja, joten tarkalleen ottaen puu ei ole polttoaineena täysin hiilineutraali (Johnson 2009). Lisäksi hakkeen ja pellettien tuotantoprosessit aiheuttavat jonkin verran kasvihuonekaasupäästöjä. Esimerkiksi pellettien tuotantoprosessin hiilijalanjäljen arvioitiin Ruotsissa olevan 10,8–14,4 g CO₂ ekv/kWh (Hagberg et al. 2009). Tästä huolimatta puukattila on kuitenkin ainakin kaukolämpöön tai sähköön verrattuna hyvin ympäristötehokas lämmöntuottotapa. SRMK D3:ssa puu luetaan luokkaan ”rakennuksessa käytettävät uusiutuvat polttoaineet”, ja sen E-luvun laskentaan käytetty kerroin on 0,5, mikä on linjassa puun polttamisen pienen hiilijalanjäljen kanssa (Ympäristöministeriö 2012). Puulämmityksen etuja ovat mm. hyvä toimintavarmuus, hyvä hyötysuhde (usein yli 80 %) ja pieni hiilijalanjälki. Haittapuolia ovat mm. polttamisesta aiheutuvat pienhiukkaspäästöt, pesän täyttämisen aiheutuva vaiva ja puun varastoimisen tilantarve.

Öljy

Öljyn energiaosuus Suomen lämmitysmarkkinoista on noin 13 % (Energiateollisuus 2013). Osuus omakotitalojen lämmityksestä on 24 % (Heiskanen et al. 2011). Toimistorakennusten lämmityksestä öljyn ja maakaasun yhteinen osuus on noin 26 % (Tilastokeskus 2007). Öljylämmitysjärjestelmä koostuu öljykattilasta, -polttimesta, -säiliöstä sekä vesikiertoisesta lämmönjaosta. Erillistä varaajaa ei välttämättä tarvita. Rakennusten lämmitykseen käytetty öljy on yleensä kevyttä polttoöljyä. Isompitehoisissa kattiloissa käytetään joskus myös raskasta polttoöljyä. Öljy on fossiilinen polttoaine, joten sen käyttö aiheuttaa aina kasvihuonekaasupäästöjä. Kevyen polttoöljyn hiilijalanjälki on noin 267 g CO₂ ekv/kWh ja raskaan polttoöljyn hiilijalanjälki on noin 279 g CO₂ ekv/kWh (Motiva 2003). SRMK D3:ssa öljy luetaan kuuluvaksi luokkaan ”fossiiliset polttoaineet”, ja sen E-lukukerroin on 1,0 (Ympäristöministeriö 2012). Öljylämmityksen etuja ovat mm. erittäin hyvä hyötysuhde moderneissa öljylämmityskattiloissa (n. 90–95 %), puhdas palaminen ja pieni tilantarve rakennuksen ulkopuolella (öljyllä on korkea lämpösisäلتö). Haittapuoliin kuuluvat mm. polttoöljyn kallis ja heittelevä hinta sekä kohtalaisen suuri huollontarve.

Maakaasu

Maakaasulämmityksen energiaosuus Suomen lämmitysmarkkinoista vain noin 1 % (Energiateollisuus 2013). Maakaasulämmityksen pieni osuus johtuu pitkälti siitä, että maakaasun jakeluverkostoja on vain tietyillä paikkakunnilla. Maakaasulämmitysjärjestelmä koostuu lämmityskattilasta, kaasupolttimesta sekä vesikiertoisesta lämmönjaosta. Järjestelmä on lähes samanlainen öljylämmitysjärjestelmän kanssa. Maakaasun koostu-

mus vaihtelee riippuen siitä, mistä kaasu on lähtöisin. Suomessa käytettävä maakaasu tulee Venäjältä, ja on 98 % metaania. Tämä maakaasu sopii hyvin juuri polttamiseen (Suomen Kaasuyhdistys 2010). Maakaasu on fossiilisista polttoaineista vähiten haitallinen ympäristölle. Sen hiilijalanjälki on noin 202 g CO₂ ekv/kWh. Maakaasu on rikitön polttoaine ja siitä aiheutuvat hiukkaspäästöt ovat melko pienet (Motiva 2003). SRMK D3 ei kuitenkaan ota E-luvun laskennassa huomioon maakaasuun pienempiä kasvihuonekaasupäästöjä, vaan sen kerroin on sama kuin öljyn, siis 1,0 (Ympäristöministeriö 2012). Maakaasulämmityksen puolesta puhuvat mm. korkea vuosihyötysuhde (yli 90 %), pieni tilantarve ja öljyä pienemmät kasvihuonekaasupäästöt. Ongelmia voi tuottaa mm. huollon tarve, jakeluverkkojen riittämättömyys ja kaasun vaihteleva hinta.

Lämpöpumput

Lämpöpumppujen energiaoisuus Suomen lämmitysmarkkinoista on noin 5 % (Energiateollisuus 2013). Erilaisia lämpöpumpputyyppejä ovat maa-, poistoilma-, ulkoilmavesi- ja ilmalämpöpumppu. Näistä merkittävin suurissa rakennuksissa on maalämpöpumppu, koska sillä pystytään kattamaan tarvittaessa suuriakin lämmitystehoja. Ilma-, ulkoilmavesi- ja poistoilmalämpöpumppuja käytetään lähinnä pientalojen toissijaisena lämmönlähteenä energiansäästötarkoituksessa. Maalämpöjärjestelmä koostuu lämpöpumpusta (kompressorin, lauhdutin, paisuntaventtiili ja höyrystin), keräysputkistosta ja vesikiertoisesta lämmönjaosta. Keräysputkisto voidaan toteuttaa kallioon porattavana lämpökaivona tai noin metrin syvyyteen asennettavana vaakaputkistona. Näistä kallioon porattava lämpökaivo on suosituimpi vaihtoehto, sillä vaakaputkisto vaatii melko suuren pinta-alan tuottaakseen tarvittavan tehon. Lämpöpumppuja voidaan käyttää myös jäähdytykseen kesällä. Maalämpöjärjestelmää ei yleensä mitoiteta kattamaan rakennuksen koko lämmitystarvetta, vaan lisälämmitykseen käytetään esimerkiksi puuta tai öljyä. Tämä johtuu maalämmön suurista investointikustannuksista (etenkin poraaminen on kallista). Lämpöpumpun ostoenergian kulutus muodostuu kompressorin sekä pumppujen sähkönkulutuksesta. Lämpöpumpun tehokkuutta mitataan COP-kertoimella, jota kutsutaan lämpöpumpun lämpökertoimeksi. Lämpökerroin kertoo kuinka monta kilowattituntia lämpöä saadaan tuotettua yhdellä kilowattitunnilla sähköä. Maalämpöpumpun lämpökerroin vaihtelee tyypillisesti välillä 3–6. Siihen vaikuttavat mm. lämpöpumpun teho, asennustapa, maan laatu ja paikallinen ilmasto (Self et al. 2013). Suomessa maalämpöpumpun keskimääräinen lämpökerroin on noin 2,4 (Lehtonen 2010, s. 9). Tällä lämpökertoimella ja keskimääräisellä lämmityssähkön hiilijalanjäljellä (400 g CO₂ ekv/kWh) laskettuna lämpöpumpulla tuotetun lämmön hiilijalanjäljeksi saadaan noin 165 g CO₂ ekv/kWh. SRMK D3:ssa kaikkea maalämmöllä tuotettua lämpöä ei luonnollisesti huomioida ostoenergiana, vaan lasketaan maalämpöpumpun käyttämän sähkön määrä ja kerrotaan se sähkön E-lukukertoimella 1,7 (Ympäristöministeriö 2012). Maalämmön puolesta puhuvat mm. pieni energian hinta, pieni huoltotarve sekä pieni tilantarve rakennuksen sisällä. Haittapuolia ovat mm. korkeat investointikustannukset ja kokemuksen puute suurien maalämpöjärjestelmien suunnittelussa ja toteutuksessa.

Aurinkolämpö

Aurinkolämmön osuus Suomen lämmitysmarkkinoista on vielä pieni. Aurinkolämmön yhteenlaskettu asennettu kapasiteetti oli Suomessa noin 23 MW vuonna 2011 (European Solar Thermal Industry Federation 2011, s. 13). Tämä johtuu etenkin Suomen pienistä säteilymääristä (keskimääräinen päivittäinen säteilyenergia Helsingissä on 2,59 kWh/m²). Myös suhteutettuna säteilymääriin ja väkilukuun on Suomen asennettu aurinkolämpökapasiteetti EU15 -maiden pienimpiä. Tähän vaikuttaa säteilymäärien

lisäksi kattavan tukipolitiikan puuttuminen. Suomessa ei ole syöttötariffia aurinkolämmölle tai -sähkölle. Suomessa on kuitenkin mahdollista saada kertaluonteinen investointituki aurinkolämpöinvestoinneille (korkeintaan 20 % investoinnista) (Työ- ja elinkeinoministeriö 2012). Aurinkolämpö toimii lisälämmönlähteenä rakennuksen päälämmitysjärjestelmän rinnalla. Aurinkolämpö sopii erityisesti sellaisien lämmitysjärjestelmien rinnalle, joissa on varaaja (kuten puu-, öljy- ja sähkölämpö). Aurinkolämpöjärjestelmässä lämmönsiirtoneste (esim. vesi-glykoliseos) kiertää katolla olevien aurinkolämpökeräimien ja yleensä varaajan alaosassa olevan lämmönsiirtimen välillä. Lämpökeräimet voivat olla taso- tai tyhjiökeräimiä. Yhden neliömetrin tasokeräin tuottaa yleensä 250–400 kWh lämpöä vuodessa. Tyhjiökeräin voi tuottaa noin 30 % enemmän lämpöä kuin tasokeräin, mutta sen investointikustannukset ovat vastaavasti suuremmat. Aurinkolämpöä voidaan myös hyödyntää passiivisesti käyttämällä hyväksi ikkunoita ja lämpöä varaavia rakenteita. Aurinkolämpö on pääosin päästötöntä ja uusiutuvaa energiaa. Joitain päästöjä toki aiheutuu käytetyistä materiaaleista sekä esimerkiksi lämmönsiirtonestettä kierrättävän pumpun sähkön kulutuksesta. Aurinkokeräimillä tuotettua lämpöä ei myöskään luonnollisesti tarvitse ottaa huomioon laskettaessa rakennuksen E-lukua. Hyviä puolia aurinkolämmössä ovat mm. päästöttömyys ja yhteensopivuus monien eri lämmitysjärjestelmien kanssa. Huonoja puolia ovat pieni lämmitysteho etenkin talvisin kun lämmitystarve on suurimmillaan ja ainakin vielä toistaiseksi melko korkeat investointikustannukset. (Celik et al. 2009) (Motiva 2012)

Taulukko 1 Yleisimmät lämmitysmuodot Suomessa (Hiilijalanjäljet viitteellisiä). * Lämpöpumpuille esitetty hiilijalanjälki on maalämmöllä tuotetun energian keskimääräinen hiilijalanjälki Suomessa.

Lämmitysmuoto	Hiilijalanjälki g CO ₂ / kWh	E-kerroin	Energiaosuus markkinoista %
Kaukolämpö	238	0,7	46
Sähkö	400	1,7	20
Puu	pieni	0,5	13
Öljy	267	1	11
Maakaasu	202	1	1
Lämpöpumput	165 *	-	8

2.2.4 Lämmin käyttövesi

Lämpimän käyttöveden kulutus lisää omalta osaltaan rakennuksen lämpöenergiantarvetta, sillä kylmä käyttövesi (lämpötila tavallisesti 5 °C) lämmitetään vähintään 55 °C:ksi rakennuksessa. Lämpimän käyttöveden lämmitykseen tarvittava energiamäärä ei kuitenkaan riipu merkittävästi ulkoilman lämpötilasta. Lämmin käyttövesi tuotetaan tavallisesti samalla lämmitysmuodolla, jolla tilatkin lämmitetään. Apuna tähän käytetään yleensä varaajaa. Tähän muodostaa poikkeuksen kaukolämpöä käyttävät rakennukset, joissa varaajaa ei tarvita. Tällöin lämpimän käyttöveden tuottamiseen käytetään kuitenkin omaa erillistä kaukolämmönsiirrintä.

Lämpimän käyttöveden kulutus on moninkertaisesti suurempaa asuinrakennuksissa, kuin toimisto- tai liikerakennuksissa. Vedenkulutukseen vaikuttavat mm. vedenkäyttötottumukset, vesikalusteiden tekninen taso, laitetekniikka ja kulutuksen seuranta. Asuinrakennuksissa eniten lämmintä käyttövettä kuluu henkilökohtaiseen hygieniaan (noin 65 %) ja astioiden pesuun (noin 25 %) (Seppänen 2001). SRMK D5 ilmoittaa lämpimän käyttöveden ominaiskulutukseksi asuinrakennuksissa 600 dm³/brm² vuodessa, kun toi-

mistorakennuksille vastaava luku on $100 \text{ dm}^3/\text{brm}^2$ (Ympäristöministeriö 2007b). 50°C :n lämpötilaerolla laskettuna ominaiskulutus vastaa asuinrakennuksilla $35 \text{ kWh}/\text{brm}^2$ ja toimistorakennuksilla $5,8 \text{ kWh}/\text{brm}^2$ lämpöenergian kulutusta vuodessa. Toimistorakennuksissa lämpimän käyttöveden kulutuksen aiheuttama lämmitystarve on siis yleensä melko pieni. Niissä toimistorakennuksissa, joissa on ruokala, kulutus kasvaa jonkin verran. Suurissa rakennuksissa joudutaan kuitenkin kierrättämään lämmintä vettä vesijohdoissa, jotta lämmintä vettä ei jouduttaisi odottamaan liian pitkään ja näin valutettaisi vettä turhaan viemäriin. Tästä aiheutuu lämpöhäviöitä, jotka lisäävät rakennuksen lämmitystarvetta. SRMK D1:n mukaan lämmintä vettä ei saa joutua odottamaan yli 10 sekuntia (Ympäristöministeriö 2007a).

2.2.5 Ilmanvaihto

Ilmanvaihto aiheuttaa merkittävän osan rakennuksen lämpöenergian käytöstä, sillä kylmä ilma tulee lämmittää ennen kuin se puhalletaan rakennukseen. Hyvin eristetyssä ja ilmatiiviissä rakennuksessa ilmanvaihdon osuus lämpöenergian kulutuksesta korostuu. Esimerkiksi Saksassa, jossa rakennusmääräykset edellyttävät hyvää lämpöeristämistä ja ilmatiiviyttä, ilmanvaihdon aiheuttama osuus lämpöenergian kulutuksesta kohoaa jopa 60 %:iin (Mardiana-Idayu & Riffat 2012). Ilmanvaihdon osuuteen rakennuksen lämpöenergian käytöstä vaikuttavat etenkin ilmanvaihdon lämmöntalteenotto (LTO) ja tilavuusvirran suuruus yhdistettynä ilmanvaihdon käyttöaikaan. Ilmanvaihdon lämpöenergian kulutus kullakin ajanhetkellä on suoraan verrannollinen tilavuusvirran suuruuteen. Seuraavaksi käsitellään lämmöntalteenoton vaikutusta ilmanvaihdon osuuteen lämpöenergian kulutuksesta. Tilavuusvirran suuruus vaikuttaa lämmityskulujen lisäksi merkittävästi myös rakennuksen sähkönkulutukseen, minkä vuoksi sitä käsitellään kohdassa 2.3.1.

LTO:n tehtävä on siirtää mahdollisimman suuri osuus ulospuhallettavan poistoilman sisältämästä lämmöstä tuloilmaan. SRMK D3 edellyttää, että ilmanvaihdon poistoilmas-
ta on otettava talteen vähintään 45 % ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsemasta lämpö-
energiasta (Ympäristöministeriö 2012). Tätä vastaava lämpöenergiänsäästö voidaan
kuitenkin haluttaessa toteuttaa myös esimerkiksi parantamalla rakennuksen lämpöeris-
tystä tai vaipan ilmanpitävyyttä. LTO voidaan toteuttaa usein eri tavoin ja kaikilla ta-
voilla on mahdollista saavuttaa vaadittu 45 %:n lämpöenergian säästö. Tyypillisimmät
lämmöntalteenotossa käytetyt lämmönsiirtimet ovat levylämmönsiirtimet, regeneratiivi-
set lämmönsiirtimet ja rekuperatiiviset lämmönsiirtimet. LTO:n tyyppejä käsitellään
tarkemmin kohdassa 5.2.1. LTO:n tehokkuutta mitataan lämpötilahyötysuhteella η_t ja
vuosihyötysuhteella η_a , joita ei tule sekoittaa keskenään. Lämpötilahyötysuhde η_t on
laitteen ominaisuus, joka saadaan selville standardoidussa testitilanteessa (standardi EN
308), jossa tulo- ja poistoilmavirrat ovat yhtä suuria. Vuosihyötysuhde η_a puolestaan
kuvaava kuinka suuri osuus ilmanvaihdon lämmitystarpeesta säästetään vuosittain. Se siis
lasketaan koko rakennuksen ilmanvaihdolle ja siihen vaikuttavat LTO:n lämpötila-
hyötysuhteen lisäksi mm. jäätyminen eston käyttöajat, rakennuksen paikkakunta, tulo- ja
poistoilmavirtojen suhde ja erillispoistojen määrä (esim. toimistorakennuksissa WC-
tilojen poistoilma puhalletaan usein huippuimurilla LTO:n ohi). SRMK D5 antaa mah-
dollisuuden käyttää vuosihyötysuhteelle arvoa $\eta_a = 0,6 \eta_t$, jos ei laskennallista vuosi-
hyötysuhdetta ole käytettävissä (Ympäristöministeriö 2007b). Todellisuudessa vuosi-
hyötysuhde on kuitenkin yleensä tätä korkeampi. (Ympäristöministeriö 2003)

2.3 Sähkönkulutus

Suomessa sijaitsevassa toimistorakennuksessa sähkönkulutus vastaa noin 50 % koko rakennuksen energiankulutuksesta, kun mukaan ei lasketa lämmityksen ja jäähdytyksen mahdollista sähkönkulutusta. Rakennusten sähkönkulutus muodostuu LVI-laitteiston, valaistuksen ja pistorasialiitännäisten laitteiden sähkönkulutuksesta. LVI-laitteiston sähkönkulutuksesta lämmityksen ja jäähdytyksen osuutta käsitellään omissa luvuissaan (luvut 2.2 ja 2.4), joten merkittävistä sähkönkuluttajista jäljelle jää ilmanvaihto. Vesi-kiertoisen lämmitysjärjestelmän ja lämpimän kiertoveden pumppujen sähkönkulutus on kokonaisuuden kannalta vähäistä. Etenkin toimistorakennuksissa myös toimistolaitteet muodostavat merkittävän osuuden rakennuksen sähkönkulutuksesta. Seuraavaksi käsitellään ilmanvaihdon, valaistuksen ja toimistolaitteiden sähkönkulutusta. Lopuksi käsitellään vielä sähkön tuottamista aurinkokennoilla. (Airaksinen & Matilainen 2011)

2.3.1 Ilmanvaihdon sähkönkäyttö

Ilmanvaihdon osuus koko toimistorakennuksen sähkönkulutuksesta voi olla jopa noin 20 % (Airaksinen & Matilainen 2011). Ilmanvaihdossa sähköä kuluu lähinnä puhaltimien pyörittämiseen. Puhaltimen teho lasketaan seuraavalla kaavalla.

$$P = \frac{\Delta p \dot{V}}{\eta}, \quad (1)$$

jossa Δp on kanaviston painehäviö, \dot{V} puhaltimen tuottama tilavuusvirta ja η puhaltimen kokonaishyötysuhde. Kaavasta nähdään, että puhaltimen sähköteho P on suoraan verrannollinen kanaviston painehäviöön ja ilman tilavuusvirtaan. Sähkönkulutuksen kannalta on tärkeää, että rakennukseen on valittu oikeankokoiset iv-koneet, jotka on mitoitettu oikein. Liian pieneksi tai suureksi mitoitettu puhallin ei toimi optimaalisesti, jolloin puhaltimen todellinen hyötysuhde jää selvästi valmistajan ilmoittamaa nimellistä hyötysuhdetta matalammaksi. Ilmanvaihdon sähkönkulutusta kuvataan SFP-luvulla (Specific Fan Power), eli IV-järjestelmän ominaissähköteholla. SFP-luku voidaan laskea joko koko rakennukselle tai yksittäiselle IV-koneelle. Koko rakennukselle laskettuna SFP-luku on IV-järjestelmän kaikkien puhaltimien yhteenlaskettu sähköteho jaettuna mitoitusjäteilmavirralla tai mitoitusulkoilmavirralla (näistä käytetään suurempaa). Yksittäiselle IV-koneelle SFP-luku saadaan jakamalla sen puhaltimien yhteenlaskettu sähköteho koneen poisto- tai ulkoilmavirralla (näistä suurempi). SFP-luvun yksikkö on $\text{kW}/(\text{m}^3/\text{s})$. SRMK D3 edellyttää, että ilmanvaihdon SFP-luku on korkeintaan $2,0 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ (kun rakennuksessa on sekä koneellinen tulo että poisto) (Ympäristöministeriö 2012).

Ilmanvaihdossa käytettävät puhaltimet jaetaan siipipyörävirtauksen kulun perusteella erilaisiin tyypeihin. Yleisimmät puhallintyypit ovat keskipako- ja aksiaalipuhallin. Keskipakopuhaltimessa virtaus on pääasiallisesti säteen suuntaista ja jättää sen akselia vastaan kohtisuorassa tasossa. Aksiaalipuhaltimessa ilma sen sijaan virtaa aksiaalikeskeisen pyöreän pinnan kautta ja jättää sen samalla tavalla (virtaus on pääosin akselin suuntaista). Eri tapauksiin soveltuvat erityyppiset puhaltimet, eikä voida suoraan sanoa, kumman puhallintyyppin hyötysuhde on korkeampi.

Puhaltimen hyötysuhteeseen vaikuttaa suuresti myös puhaltimen säätötapa. Puhaltimen säätö voidaan toteuttaa kuristus-, johtosiipi-, siipikulma- tai pyörimisnopeussäätönä. Kuristussäädössä ilmavirtaa pienennetään kanavistoon asennettavalla säätöpellillä. Joh-

tosiipisäädössä ilmalle annetaan puhaltimen siipipyörän suuntainen pyörimisliike imuaukossa, jolloin tilavuusvirta vähenee. Siipikulmasäädössä taas muutetaan siiven asentoa (soveltuu vain aksiaalipuhaltimille). Pyörimisnopeussäädössä säädetään nimensä mukaisesti puhaltimet pyörimisnopeutta. Energiatehokkain ja yleisimmin käytetty säätötapa on pyörimisnopeussäätö. Pyörimisnopeussäätö toteutetaan yleensä taajuusmuuttajalla ja oikosulkumoottorilla tai tyristorisäädöllä varustetulla tasavirtamoottorilla. (Seppänen 1996)

Ilmanvaihtokanaviston painehäviöt muodostuvat kitka- ja kertapainehäviöistä. Sekä kitka- että kertapainehäviöt ovat verrannollisia ilman nopeuden toiseen potenssiin. Tämä tarkoittaa sitä, että painehäviöitä voidaan ehkäistä tehokkaasti väljällä kanavamitoituksella. Kitkapainehäviöillä tarkoitetaan kitkasta kaikkialla kanavistossa aiheutuvia painehäviöitä. Niitä voidaan tehokkaimmin ehkäistä väljän kanavamitoituksen lisäksi vähentämällä kanaviston pituutta tarkoituksenmukaisella suunnittelulla. Kertapainehäviöt aiheutuvat kanavistossa olevista mutkista ja muista esteistä, kuten äänenvaimentimista, suodattimista ja LTO:sta. Kertapainehäviöitä voidaan ehkäistä välttämällä kanavistossa turhia mutkia ja käyttämällä pienen painehäviön suodattimia ja äänenvaimentimia. Painehäviöiden hallitsemiseksi on myös tärkeä pitää kanavisto sekä siihen kuuluvat komponentit puhtaana. Esimerkiksi LTO-laitteen puhdistus olisi hyvä tehdä aina, kun sen yli mitattava painehäviö on kasvanut tiettyyn ennalta sovittuun arvoon.

2.3.2 Valaistus

Valaistuksen osuus kaupallisen rakennuksen sähkönkulutuksesta on tyypillisesti 20–45 %. Vaihtelu eri rakennusten välillä on kuitenkin suurta. Airaksinen & Matilainen (2011) saivat simuloinneissaan Suomessa sijaitsevalle toimistorakennukselle valaistuksen sähkönkulutuksen osuudeksi noin 35 %. Toimistorakennuksissa valaistuksen käyttö on jaksoittaista ja usein säännöllistä. Valaistus on tavallisesti päivittäin päällä noin klo 7–17. Ruotsissa toimistorakennusten keskimääräinen valaistuksen sähkönkulutus vuonna 2010 tehdyssä tutkimuksessa oli 21 kWh/m². Tätä vastaava yhteenlaskettu asennettujen valaisimien teho oli keskimäärin 10,5 W/m². Realistinen tavoite valaistuksen sähkönkulutukselle on Dubois:n ja Blomsterberg:n (2011) mukaan noin 10 kWh/m². Tämä vaatisi vähintään 50 %:n vähennyksen keskimääräisestä sähkönkulutuksesta. Keinoja, joilla valaistuksen sähkönkulutusta voidaan pienentää, käsitellään kohdassa 5.4. (Dubois & Blomsterberg 2011)

2.3.3 Toimistolaitteet

Toimistorakennuksissa toimistolaitteet luonnollisesti muodostavat merkittävän osan rakennuksen sähkönkulutuksesta. Airaksisen ja Matilaisen (2011) simulaatioissa toimistolaitteiden sähkönkulutuksen osuus oli noin 40–60 % koko rakennuksen sähkönkulutuksesta. Toimistolaitteiksi luetaan yleensä tietokoneet (myös kannettavat) näyttöineen, kopiokoneet, tulostimet ja palvelimet. SRMK D5 ilmoittaa seuraavat tyypilliset toimistolaitteiden vuotuiset energiankulutukset: PC + näyttö 430 kWh/kpl, kannettava PC 24 kWh/kpl, kopiokone 1700 kWh/kpl, lasertulostin 400 kWh/kpl (Ympäristöministeriö 2007b). Pöytätietokoneet ja niiden näytöt muodostavat lukumääränsä vuoksi suurimman osan toimistolaitteiden sähkönkulutuksesta.

Toimistolaitteiden sähkönkulutusta voidaan vähentää vaikuttamalla käyttäjien käyttötottumuksiin, käyttämällä laitteiden virranhallintaominaisuuksia tehokkaasti ja käyttämällä

ENERGY STAR merkittyyä toimistolaitteita. ENERGY STAR on kansainvälinen energiatehokkaiden sähkölaitteiden merkintäjärjestelmä. Se sai alkunsa vuonna 1992 Yhdysvaltojen ympäristönsuojeluviraston (EPA) toimesta. ENERGY STAR merkinnän saaminen edellyttää, että laite täyttää virranhallinta- ja maksimitehovaatimukset (European Commission 2012b). Käyttäjien käyttötottumukset vaikuttavat mm. siihen ovatko laitteet päällä työaikojen ulkopuolella ja siihen miten laitteiden virranhallintaominaisuuksia hyödynnetään. Japanissa tehdyissä tutkimuksissa saatiin seuraavat pois päältä olevien laitteiden osuudet työaikojen ulkopuolella: kannettavat PC:t 97 %, pöytätietokoneet 82 %, näytöt (pöytätietokoneiden) 60 %, kopiokoneet 55 %. Etenkin pöytätietokoneiden näyttöjen ja kopiokoneiden sammutustottumuksissa näyttää siis olevan parantamisen varaa. Toimistolaitteiden virranhallinta perustuu siihen, että laite menee matalaenergiatilaan sen ollessa käyttämätön tietyn ajan tai silloin kun se manuaalisesti asetetaan tähän tilaan. Matalaenergiatilassa laitteiden sähkönkulutus on yleensä selkeästi tavanomaista tilaa pienempi. Esimerkiksi Yhdysvalloissa vuonna 2002 pöytätietokoneen keskimääräinen teho normaalitilassa oli 55 W ja matalaenergiatilassa (nukkumatilassa) vain 25 W. LCD-näytölle vastaavat luvut olivat 15 W ja 1,5 W. On siis selvää, että virranhallintaa käyttämällä saavutetaan merkittäviä säästöjä toimistolaitteiden sähkönkulutuksessa. Käyttämällä virranhallintaa kaikissa laitteissa (virranhallinnan viive 60 min) saavutettiin Japanissa noin 32 %:n säästöt toimistolaitteiden sähkönkulutuksessa verrattuna tilanteeseen, jossa virranhallintaa ei käytetty lainkaan. Säästöjen suuruuteen vaikuttaa etenkin viive jonka jälkeen laitteet siirtyvät matalaenergiatilaan. Mitä lyhyempi kyseinen viive on, sitä suuremmat säästöt saavutetaan. Lyhentämällä viivettä 60 minuutista 5 minuuttiin saavutettiin vielä 28 %:n lisäsäästöt. Lyhyt virranhallinnan viive voi kuitenkin aiheuttaa ärtymystä joillekin työntekijöille varsinkin, jos matalaenergiatilasta palautuminen vie runsaasti aikaa. Tällöin työntekijät saattavat poistaa virranhallinnan käytöstä. Nykyiset tietokoneet ovat kuitenkin yleensä melko nopeita palautumaan matalaenergiatilasta. Pienentämällä toimistolaitteiden sähkönkulutusta voidaan saavuttaa säästöjä myös jäähdytysenergian kulutuksessa, kun tilojen lämpökuormat vähenevät. (Kawamoto et al. 2004)

2.3.4 Aurinkosähkö

Rakennuksen sähkön ostoenergiankulutusta voidaan vähentää tuottamalla osa kulutettavasta sähköenergiasta aurinkokennotekniikalla. Kuten aurinkolämmön, myös aurinkosähkön kokonaiskapasiteetti on Suomessa vielä melko pieni. Suurin osa Suomessa käytettävistä aurinkokennoista on verkkoon kytkemättömiä paikallisia tuotantojärjestelmiä, jotka sijoittuvat vapaa-ajan asuntoihin. Aurinkosähköinvestointeihin on mahdollista Suomessa saada valtiollista tukea korkeintaan 30 % investointikustannuksista (Työ- ja elinkeinoministeriö 2012).

Yleisimmin käytetty materiaali aurinkokennoissa on pii. Käytetty pii voi olla yksikiteistä, monikiteistä tai kidemuodotonta. Aurinkokennon hyötysuhteella tarkoitetaan sitä osuutta kennolle osuvasta auringon säteilytehosta, joka pystytään muuttamaan sähköksi. Yksikiteisillä piikennoilla on parhaat hyötysuhteet (16–24 %), mutta ne ovat myös melko kalliita. Monikiteiset piikennot ovat yksinkertaisemman valmistusprosessin vuoksi halvempia valmistaa, mutta niiden hyötysuhde on myös matalampi (14–18 %). Kidemuodotonta piitä käytetään ohutkalvoaurinkokennoissa, jossa seoksen päällä on erittäin ohut kerros piitä. Kidemuodottoman piikennon hyötysuhde on tyypillisesti 4–10 %. Muita ohutkalvoaurinkokennoissa käytettäviä materiaaleja ovat kadmium-telluuri (CdTe) ja CIGS (Copper Indium Gallium Selenide). CdTe-kennojen valmistuskustan-

nukset ovat ohutkalvokennoista matalimmat, minkä vuoksi niitä pidetään lupaavimpina ohutkalvokennoina. CdTe-kennojen hyötysuhde on tyypillisesti 9,4–13,8 %. (Jelle et al. 2012)

Tyypilliset aurinkokennojen sijoituspaikat rakennuksessa ovat katto, julkisivut ja varjostinjärjestelmät. Aurinkokennot voidaan asentaa tavallisten rakenteiden päälle tai ne voidaan integroida rakennuksen rakenteisiin, jolloin ne korvaavat tavallisia ulkovaippamateriaaleja. Rakenteisiin integroiduista aurinkokennoista käytetään termiä BIPV (Building-integrated photovoltaics). Näin voidaan vähentää aurinkokennojen aiheuttamia lisäkustannuksia rakennukselle. Tämä aiheuttaa kuitenkin luonnollisesti lisävaatimuksia mm. kennojen kestävyydelle ja vesitiiviydelle. BIPV kennoja voidaan käyttää myös läpinäkyvissä pinnoissa kuten lasikatoissa ja –julkisivuissa. (Jelle et al. 2012)

Rakennusten aurinkosähköjärjestelmien rahalliset takaisinmaksuajat ovat yleensä ilman valtion tukea reilusti yli 10 vuotta. Rahallisen takaisinmaksuajan lisäksi voidaan tarkastella takaisinmaksuaikaa energian kannalta. Takaisinmaksuaika energian kannalta tarkoittaa sitä aikaa, joka kuluu sen energiamäärän tuottamiseen, mikä on kulunut kennon valmistamiseen. Sveitsissä tehdyssä tutkimuksessa, jossa tutkittiin kolmea 3 kW:n aurinkosähkövoimalaa, saatiin kyseiseksi ajaksi yksikiteisille piikenoille 4–6 vuotta ja monikiteisille 3,5–4,5 vuotta. Aurinkosähköjärjestelmien kannattavuuteen vaikuttaa merkittävästi se voidaanko ylimääräinen sähkö myydä takaisin verkkoon ja millä hinnalla. Suomen lainsäädännössä ei ole määrätty sähköverkkoyhtiöille ostovelvoitetta pientuottajien oman kulutuksen ylittävälle tuotannolle. Aurinkosähkön tuottajien pitäisi siis itse löytää sähkölle ostaja, eikä heillä usein ole aikaa eikä ammattitaitoa tähän. Silloinkin kun ostaja löytyy ylijäämäenergiasta saatu korvaus jää yleensä erittäin pieneksi. Tämän vuoksi aurinkosähkön tuottajat investoivat usein omiin akkuihin tai lämmönvaraajiin, vaikka tämä ei energiatehokkuuden kannalta usein olekaan tehokkain ratkaisu (Sitra 2012). Tulevaisuudessa maailmanlaajuisten BIPV markkinoiden uskotaan kasvavan vuoden 2009 1,8 miljardista dollarista 8,7 miljardiin dollariin, vuoteen 2016 mennessä. Tämä johtuu mm. aurinkosähköjärjestelmien laskevista hinnoista ja fossiilisten polttoaineiden kallistumisesta. (Jelle et al. 2012)

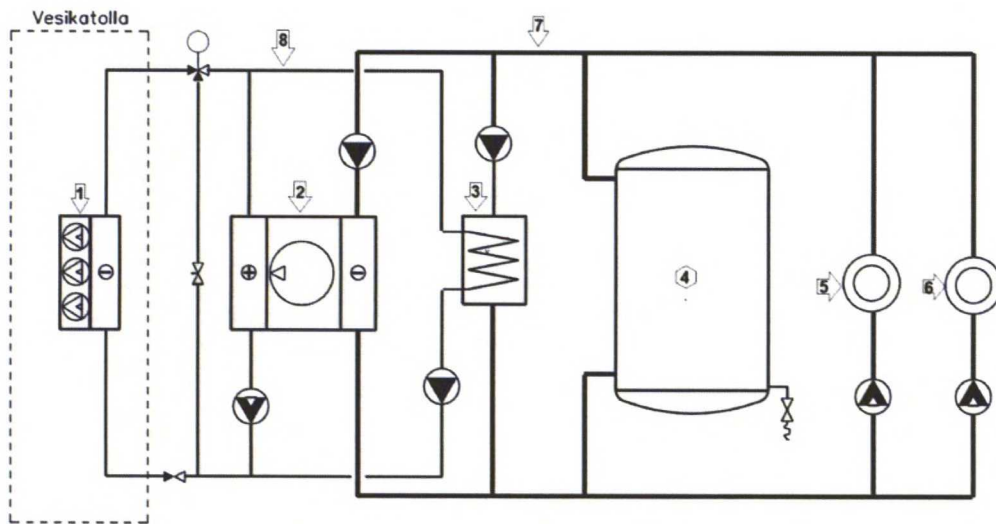
2.4 Jäähdytys

Jäähdytys muodostaa merkittävän osan liikerakennusten energiankulutuksesta. Airaksisen ja Matilaisen (2011) simuloinneissa jäähdytyksen osuus energian kokonaiskulutuksesta oli välillä 15–22 %. Asuinrakennuksissa jäähdytyksen käyttö on Suomessa vielä vähäistä, mutta yleistyy mahdollisesti tulevaisuudessa.

2.4.1 Jäähdytysmuoto

Jäähdytysenergia voidaan tuottaa joko kiinteistökohtaisesti tai käyttää kaukojäähdytystä. Kiinteistökohtainen kylmäntuotto on näistä perinteisempi ja ainakin toistaiseksi yleisempi vaihtoehto. Kiinteistökohtaisista jäähdytysjärjestelmistä vedenjäähdytyskone (VJK) on yleisin. Itse vedenjäähdytyskone on lämpöpumppu, joka siirtää lämpöä kahden kiertopiirin välillä. Ensiopiirissä lämmönsiirtoaine (yleensä vesi) lämpenee vedenjäähdyttimen lauhduttimessa vedenjäähdyttimessä kiertävän kylmäaineen lauhtuessa. Tämän jälkeen lämmönsiirtoaine kuljetetaan yleensä vesikatolla sijaitsevaan nestejäähdyttiin, jossa se jäähtyy. Sitten lämmönsiirtoaine palautetaan vedenjäähdyttimen lauhduttimelle. Toisiopiirissä lämmönsiirtoaine jäähtyy vedenjäähdyttimen höyrysti-

messä vedenjäähdyttimessä kiertävän kylmäaineen höyrystyessä. Sitten lämmönsiirtoaine lämpenee rakennuksen jäähdytysverkostossa palatakseen jälleen vedenjäähdyttimen höyrystimelle. Lisäksi toisiopiirissä on jäähdytysvesisäiliö tehohuippujen tasaamiseksi. Joissain vedenjäähdytyskonejärjestelmissä on vielä näiden lisäksi vapaajäähdytyslämmönsiirrin, jota käytetään silloin kun ulkoilma on niin kylmää, että sitä voidaan käyttää jäähdytykseen suoraan käyttämättä lämpöpumppua. Näin säästetään sähköä. Vedenjäähdytyskoneen sähkönkulutukseen vaikuttaa oleellisesti sen kylmäkerroin (COP). Se kertoo kuinka monta kilowattituntia jäähdytysenergiaa laite tuottaa kuluttaessaan yhden kilowattitunnin sähköä. VJK:n kylmäkerroin riippuu höyrystymis- ja lauhdumislämpötiloista, laitteen teknisistä ominaisuuksista sekä käytetystä kylmäaineesta. Tällä tavoin tuotetun jäähdytyksen hiilijalanjälki riippuu käytettävän laitteiston vuosikylmäkertoimesta.



Kuva 4 VJK:n periaatekaavio (Toivanen 2010, s. 6).

Kuvassa numeroidut laitteet ovat

1. Nestejäähdytin
2. Vedenjäähdytin
3. Vapaajäähdytyslämmönsiirrin
4. Jäähdytysvesisäiliö
- 5.–7. Toisiopiiri
8. Ensiöpiiri.

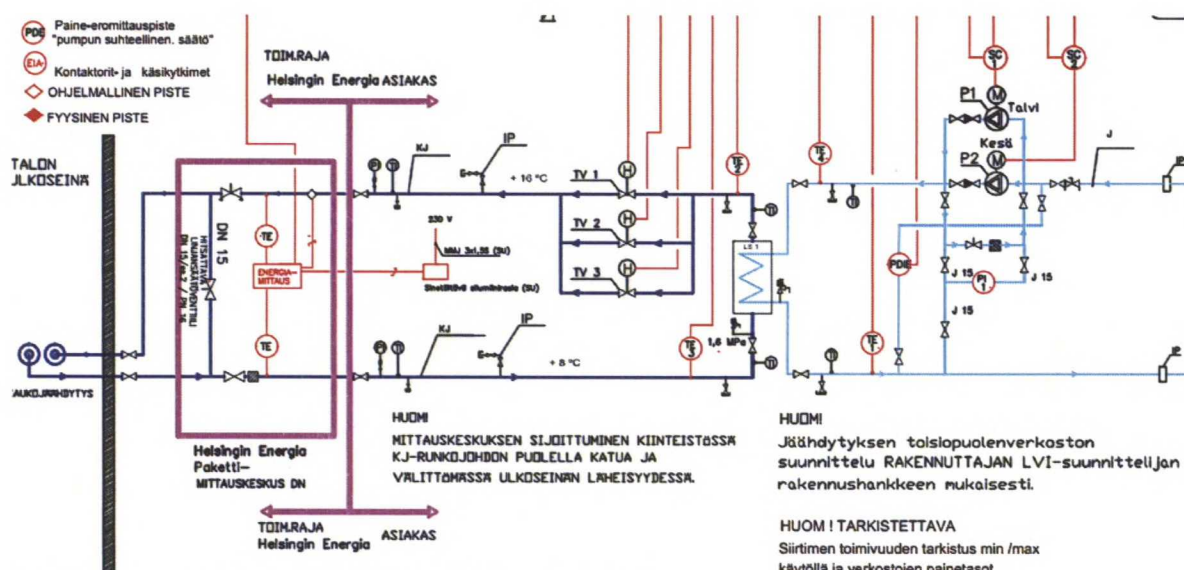
Kiinteistökohtaiseen kylmäntuottoon voidaan käyttää myös suora jäähdytystä. Suora jäähdytyksessä kylmäaine höyrystyy suoraan kohteessa, jota halutaan jäähdyttää. Suora jäähdytyksessä ei siis käytetä väliainetta kylmän siirtämiseen. Suora jäähdytystä käytetään yleensä pienissä kohteissa, joissa jäähdytettävien tilojen määrä on pieni. Pientaloissa käytettävät lämpöpumput ovat esimerkki suora jäähdytyksestä.

Kolmas menetelmä kiinteistökohtaiseen kylmäntuottoon on maalämpöpumpun keruuputkiston hyödyntäminen jäähdytyskauden aikana. Maalämpöpumpun toimintaperiaate on oleellisilta osiltaan sama kuin VJK:lla. Vesikatolla sijaitsevan nestejäähdyttimen tilalla vain on maassa sijaitseva keruuputkisto. Jos maaperä on tarpeeksi kylmä, voidaan käyttää vapaajäähdytystä, jolloin lämpöpumppuprosessia ei tarvitse käyttää. Näin jääh-

dytyksen ainoa energiankulutus muodostuu pumppujen käyttämästä energiasta. Vapaa-jäähdytystä voidaan käyttää, mikäli maaperästä palaavan lämmönkeruunesteen lämpötila on korkeintaan sama kuin jäähdytysverkoston menoveden lämpötila. Mikäli vapaa-jäähdytys ei riitä, voidaan maalämpöpumppua käyttää samaan tapaan kuin VJK:ta. Maa on kesällä huomattavasti kylmempää kuin ulkoilma, minkä vuoksi maalämpöpumppu toimii jäähdytyskäytössä huomattavasti paremmalla COP-kertoimella kuin tavallinen VJK.

Kaukojäähdytys on melko uusi kylmän tuotantotapa. Sitä on toistaiseksi tarjolla Suomessa vain muutamassa kaupungissa. Suurin kaukojäähdytysverkosto löytyy Helsingistä. Helsingin kaukojäähdytysverkostolla on noin 200 asiakasta ja sen yhteenlaskettu liittymisteho on yli 110 MW (Helsingin Energia 2011). Kaukojäähdytys toimii pitkälti samalla toimintaperiaatteella kuin kaukolämmitys. Ensiöpuolella kaukojäähdytysverkoston vesi lämpenee kiinteistön lämmönvaihtimessa. Toisiopuolella taas kiinteistön jäähdytysvesi viilenee paluulämpötilasta menolämpötilaan (kts. alla). Kaukokylmä tuotetaan pääosin kolmella tavalla: vapaajäähdytyksellä, lämpöpumppuprosessilla ja absorptiojäähdytysprosessilla. Vapaa-jäähdytyksessä kaukokylmää tuotetaan lämmönsiirtimien avulla samaan tyyliin kuin kiinteistökohtaisessa vapaa-jäähdytyksessä. Vapaa-jäähdytyksen pääasiallinen lähde on viileä merivesi. Merivesi on tähän tarkoitukseen riittävän viileää huhtikuun loppuun saakka. Silloin kun kylmänlähteen lämpötila ei ole tarpeeksi viileä kylmän tuottamiseen vapaa-jäähdytyksellä, käytetään apuna lämpöpumppuprosessia. Absorptiojäähdytysprosessi on lämpöpumppuprosessin kaltainen, mutta se käyttää ajavana voimana kompressorin sähkön sijasta lämpöä. Matalasta hyötysuhteestaan huolimatta sen käyttö voi olla ympäristötehokasta, jos siinä käytettävä lämpö on hukkalämpöä. Käytettävä lämpö voidaan saada esimerkiksi yhteistuotantolaitoksissa syntyvästä ylimääräisestä lämpöenergiasta. Kaukojäähdytyksen hiilijalanjälki riippuu voimakkaasti tavasta, jolla kaukokylmä tuotetaan. Helsingin Energian tuottaman kaukojäähdytyksen keskimääräinen hiilijalanjälki on noin 70 g CO₂ ekv/kWh (Salmi 2013).

SRMK D3:ssa kaukojäähdytyksen E-lukukerroin on 0,4 (Ympäristöministeriö 2012). Kaukojäähdytyksen hinta riippuu voimakkaasti ulkoilman lämpötilasta. Mitä lämpimämpää ulkoilma on, sitä kalliimpaa on myös kaukojäähdytys. Tämä johtuu edellä kuvattujen tuotantotapojen erilaisista muuttuvista kustannuksista. Kaukojäähdytyksen etuja ovat päästöttömyys, luotettavuus, äänettömyys ja kiinteistön tilasäästöt. Haittapuolia ovat rajoitettu saatavuusalue ja hinnan voimakkaat vaihtelut. (Niskanen 2013, s. 8)



ESIMERKKI KYTKENTÄKAAVIO (alle 300KW)

Kuva 5 Esimerkki kaukojäähdytyksen kytkentäkaaviosta (Helsingin Energia 2013)

2.4.2 Jäähdytystarve

Rakennuksen jäähdytystarve määräytyy rakennuksen energiataseen perusteella. Etenkin sisäiset lämpökuormat ovat merkittävässä asemassa. Lämpökuormia aiheuttavat mm. ulkoilman lämpötila, auringon säteily, ihmiset ja sähkölaitteet. Jäähdytysjärjestelmä tulee mitoittaa ja jäähdytystarve arvioida käyttäen dynaamista laskentaa, jossa rakennuksen lämpökapasiteetti ja lämpökuormien vaihteleva luonne huomioidaan. Mitä suurempi rakennuksen lämpökapasiteetti on, sitä pienempi tavallisesti on jäähdytysenergian tarve sekä jäähdytyksen maksimitehon tarve.

Auringon säteily aiheuttaa lämpökuormia suoraan ikkunoiden läpi sekä lämmittämällä rakennuksen ulkorakenteita. Mikäli ikkunat ovat suunniteltu hyödyntämään mahdollisimman tehokkaasti lämmityskaudella auringon säteilystä saatavaa ilmaisenergiaa sekä valoa sähkövalaistuksen sähkönkulutuksen minimoimiseksi, tämä voi aiheuttaa jäähdytyskaudella suurempia lämpökuormia ja näin lisätä jäähdytysenergian kulutusta. Tällöin jäähdytyskaudella onkin usein syytä käyttää esimerkiksi varjostimia jäähdytysenergian kulutuksen minimoimiseksi. Keinoja jäähdytysenergian kulutuksen vähentämiseksi käsitellään kohdassa 5.6.

Ihmiset ja sähkölaitteet aiheuttavat rakennukseen sisäisiä lämpökuormia. Ihmisen aiheuttamaan lämpökuormaan vaikuttaa ihmisen aktiviteettitaso. Tätä tasoa mitataan metabolisella ekvivalentilla (MET). Ihmisen lämpöteho ilmoitetaan yleensä ihon pinta-alayksikköä kohden. 1 MET vastaa ihmisen lämpötehoa levossa (58 W/m^2). Keskikokoisen henkilön ihopinta-ala on noin $1,8 \text{ m}^2$. Toimistotyöntekijän aktiviteettitaso on noin 1,0–1,2 MET. Yksi toimistotyöntekijä aiheuttaa yleensä siis 105–125 W:n lämpökuorman (Seppänen 1996). Sähkölaitteiden kohdalla oletetaan yleensä, että niihin tuotu sähköteho siirtyy loppujen lopuksi kokonaisuudessaan lämpökuormiksi joko konvektion tai lämpösäteilyn kautta. Näin ollen säästö sähkölaitteiden sähkön kulutuksessa aiheuttaa myös säästöjä jäähdytysenergian kulutuksessa.

3 Energiatehokkuuden mittarit ja indikaattorit

Energiatehokkuuden kehittäminen ja seuraaminen edellyttävät, että energian käyttöä voidaan mitata ja että mittatieto on helposti saatavilla kaikille sitä tarvitseville osapuolille. Mittareiden ja indikaattorien laskemiseen tarvittava tieto on yleensä peräisin kiinteistön käytön, ylläpidon ja hallinnan järjestelmistä. Mittarit kertovat kuinka paljon on kulutettu resursseja tai tuotettu jotain. Energiatehokkuudelle tavallisin mittari on energian kulutus, jonka yksikkö on tavallisesti kWh tai MWh. Mittarit soveltuvat hyvin esimerkiksi tavoitteiden toteutumisen seurantaan ja energiankulutuksen muutosten seuraamiseen. Sen sijaan vertailuun muiden rakennusten kanssa mittarit soveltuvat huonommin. Tähän tarkoitukseen soveltuvat paremmin indikaattorit. Indikaattorit ovat mittareita suhteutettuna johonkin tunnettuun pohjatietoon. Rakennusten tapauksessa tämä tarkoittaa mittareiden suhteuttamista esimerkiksi rakennuksen pinta-alaan tai tilavuuteen. Indikaattorin yksikkö voi siis olla esimerkiksi kWh/m². Rakennuksen käyttötarkoitus vaikuttaa siihen mihin pohjatietoihin energiatehokkuuden mittarit kannattaa suhteuttaa. Esimerkiksi toimistorakennuksissa indikaattoreina voisi olla energiankulutus työpisteitä (kWh/tp) tai tehtyjä henkilötyövuosia (kWh/htv) kohden. Liiketiloiissa taas energiankulutus voidaan suhteuttaa vaikka asiakkaiden määrään. Nämä indikaattorit kuvaavat kyseisissä tapauksissa paremmin tilankäytön tehokkuutta, kuin pinta-alaan tai tilavuuteen suhteutetut indikaattorit.

Energiatehokkuuden mittareita ja indikaattoreita voidaan käyttää moniin eri tarkoituksiin kuten tavoitteiden asettamiseen ja niiden toteutumisen seurantaan, rakennuksen toiminnan arviointiin, vertailuun muiden rakennusten kanssa ja rakennuksen käyttäjien/omistajien toiminnan ohjaamiseen. Niitä voidaan käyttää myös markkinointitarkoituksessa imagosyistä. Lisäksi energiatehokkuuden indikaattoreita käytetään viranomais-säätelystä sekä vapaaehtoisissa standardointi- ja luokitusjärjestelmissä (mm. LEED, BREEAM ja PromisE).

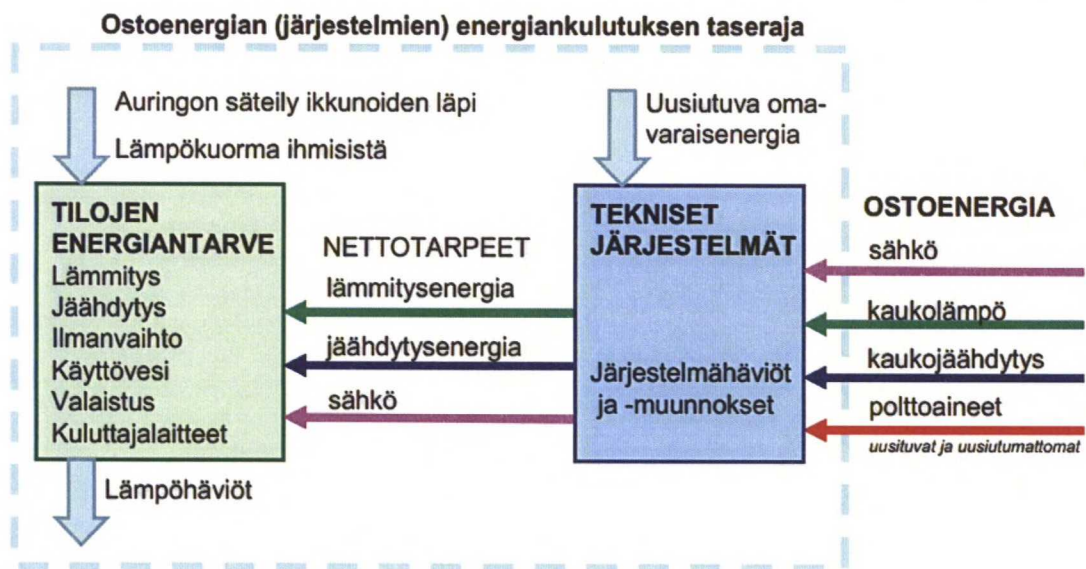
Tässä luvussa käsitellään ensin kahta viranomaisten käyttämää indikaattoria Suomessa, E-lukua ja energiatodistuksessa esiintyvää ET-lukua. Tämän jälkeen esitellään Green Building Council Finlandin johtaman Värkki-projektin tuloksena syntyneitä yksityisten toimijoiden käyttöön tarkoitettuja käytönajan mittareita sekä arvioidaan lyhyesti näiden soveltuvuutta rakennusten ympäristötehokkuuden mittaamiseen. Värkki-projektin tuloksiin kuuluu myös elinkaaren hiilijalanjälki mittari. Tätä mittaria esitellään omassa luvussa ”Hiilijalanjäljen laskennan kuvaus”.

3.1 Viranomaisten käyttämät indikaattorit Suomessa

3.1.1 E-luku

Viimeisin rakennusmääräysten päivitys tuli Suomessa voimaan kesällä 2012 (SRMK D3). Tämä päivitys on askel kokonaisenergiatarkastelun suuntaan, sillä siinä edellytetään, että rakennukselle lasketaan koko rakennuksen energiatehokkuutta kuvaava indikaattori, E-luku. E-luku on laskettava kaikille uusille rakennuksille (pl. jotkin erityistapaukset, kuten kasvihuoneet ja väestönsuojat). Aikaisemmissa määräyksissä kokonaisenergiatarkastelua ei edellytetty, mutta useamman yksittäisen asian energiatehokkuudesta oli säädetty erikseen. Viimeisin päivitys antaa siis paremmat mahdollisuudet toteuttaa energiatehokkuutta parantavat toimenpiteet kustannustehokkaasti. (Ympäristöministeriö 2012)

E-luku on energiamuotojen kertoimilla painotettu vuotuinen ostoenergian kulutus jaettuna rakennuksen lämmitetyllä nettoalalla (kWh/m^2). Ostoenergialla tarkoitetaan energiaa, joka tulee rakennukseen sähköverkosta, kaukolämpö- tai kaukojäähdytysverkosta tai polttoaineen energiasisällön mukana. Paikan päällä esimerkiksi auringon säteilystä tuotettua energiaa ei siis tarvitse laskea mukaan. E-lukulaskuissa esiintyvä ostoenergiankulutus ei ole kuitenkaan sama kuin rakennuksen todellinen ostoenergiankulutus, sillä E-lukua laskettaessa rakennuksen kulutus lasketaan standardikäytöllä. Tämä johtuu siitä, että E-luvun on tarkoitus kuvata rakennuksen itsensä energiatehokkuutta, ei esimerkiksi rakennuksen käyttäjien toiminnan ekologisuutta. (Ympäristöministeriö 2012)



Kuva 6 Ostoenergiankulutuksen taseraja (Ympäristöministeriö 2012)

Lämmitys- ja jäähdytysenergiankulutuksen laskennassa käytetään säätietoja, joissa Suomi on jaettu neljään eri säävyöhykkeeseen. Sää tiedot pohjautuvat Helsinki-Vantaan lentoaseman, Jyväskylän lentoaseman ja Sodankylän tutkimuskeskuksen säähavainto- asemien mittauksiin vuosilta 1980–2009. Näistä mittauksista on koostettu mahdollisimman keskimääräinen testivuosi, jota käytetään energiankulutuksen laskentaan. SRMK D3:ssa on myös asetettu vaatimuksia lämpö- ja jäähdytysenergian laskentaan käytettävälle laskentatyökalulle (Ympäristöministeriö 2012). Laskentatyökalun tulee laskea vähintään lämmitysenergian nettotarve. Jos rakennuksessa on lisäksi jäähdytysjärjestelmä, niin myös jäähdytysenergian nettotarve tulee laskea. Laskenta voidaan suorittaa kuukausitasolla (olettaen stationääritilanne), mikäli rakennuksessa ei ole jäähdytystä, tai jäähdytys on vain yksittäisissä tiloissa. Kaikissa muissa tapauksissa laskenta tulee suorittaa ns. dynaamisella laskentatyökalulla. Dynaamisessa energialaskennassa lämmitys-/jäähdytysteho ovat ajasta riippuvia suureita (ei oleteta stationääritilannetta). Aikayksikkönä käytetään yleensä yhtä tuntia. Dynaaminen energialaskenta ottaa huomioon rakenteiden kyvyn varata lämpöä. Dynaamisia laskentatyökaluja ovat mm. Granlundin Suomessa kehittämä RIUSKA sekä Ruotsissa kehitetty IDA Indoor Climate and Energy. (Ympäristöministeriö 2012)

Primäärienergialla tarkoitetaan luonnossa esiintyvää jalostamatonta energiaa, jota ei ole vielä muunnettu käyttökelpoiseksi energiaksi. Primäärienergiaa ovat esimerkiksi vesi-

voima, tuuli, auringon säteily sekä polttoaineiden sisältämä energia. Energiamuodon primäärienergiakerroin kertoo siis kuinka monta energiayksikköä vaaditaan yhden energiayksikön tuottamiseen käyttökelpoista energiaa (esim. sähköä, kaukolämpöä tai kaukojäähdytystä). Alla olevassa taulukossa on esitetty SRMK D3:ssa esiintyvät energiamuotojen kertoimet sekä Suomessa tuotetun energian primäärienergiakertoimien keskiarvot vuosilta 2000–2008.

Taulukko 2 SRMK D3:n energiamuotojen kertoimet (Ympäristöministeriö 2012) sekä Suomessa tuotetun energian keskimääräiset primäärienergiakertoimet vuosilta 2000–2008 (Keto 2010).

Energiamuoto	kerroin (SRMK D3)	primäärienergiakerroin
sähkö	1,7	2,3
kaukolämpö	0,7	0,9
kaukojäähdytys	0,4	-
fossiiliset polttoaineet	1,0	1,0
uusiutuvat polttoaineet	0,5	1,0

Energiamuotojen kertoimien tarkoitus SRMK D3:ssa on suosia niitä energiamuotoja, jotka kuluttavat vähemmän primäärienergiaa ja joiden hiilijalanjälki on pieni. Sekä fossiiliset että uusiutuvat polttoaineet ovat primäärienergiaa, minkä vuoksi niiden primäärienergiakerroin on 1. Taulukosta voi nähdä, että SRMK D3:n kertoimet seurailevat väljästi primäärienergiakertoimia, mutta ovat sähkön, kaukolämmön ja uusiutuvien polttoaineiden osalta matalampia. Tämä johtuu siitä, että sekä kaukolämmön että sähkön tuotannossa käytetään fossiilisten polttoaineiden lisäksi myös uusiutuvia energianlähteitä, minkä vuoksi niiden päästökertoimet ovat matalampia kuin jos niiden tuotantoon olisi käytetty pelkästään fossiilisia polttoaineita. Uusiutuvien polttoaineiden matala kerroin (0,5) selittyy niiden alhaisilla kasvihuonekaasupäästöillä. Kaukokylmän tuotannossa hyödynnetään mm. vapaajäähdytystä ja muissa prosesseissa syntynyttä hukkalämpöä, mikä vuorostaan selittää kaukojäähdytyksen matalan kertoimen (0,4) (kts. kohta 2.4.1).

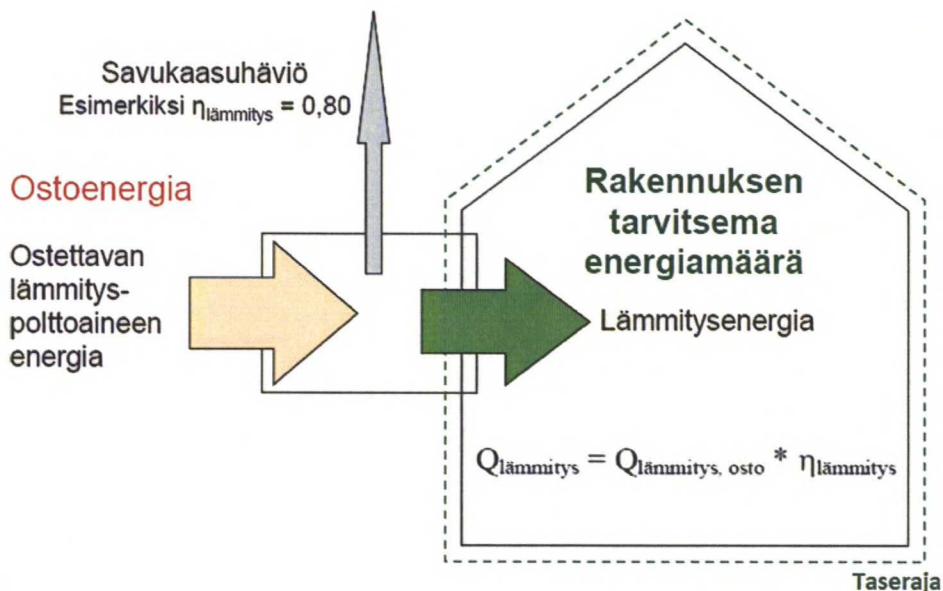
SRMK D3:n uusimmassa päivityksessä toteutetut määräysten tiukennukset edellyttävät keskimäärin 20 %:n parannusta aikaisempien määräysten edellyttämään energiatehokkuuteen. Määräyksissä on säädetty käyttötarkoituksiluokkakohtaiset ylärajat E-luvulle. Pientalon suurin sallittu E-luku vaihtelee välillä 130–204 kWh/m². Mitä isompi kyseessä oleva pientalo on pinta-alaltaan, sitä tiukempi on E-lukuvaatimus. Nämä vaatimukset tarkoittavat käytännössä, että jos pientalossa halutaan käyttää sähkölämmitystä, niin pientalon on oltava energiankulutukseltaan matalaenergiatasoa ja varustettu varaavalla tulisijalla. Toimistorakennukselle suurin sallittu E-luku on 170 kWh/m². Toimistorakennuksen E-lukuvaatimus ei ole erityisen tiukka ja se voidaan saavuttaa tavanomaisin suunnitteluratkaisuin. Jos vaatimus yritetään saavuttaa vain lämpöeristystä parantamalla, investointikustannukset voivat tosin nousta melko korkeiksi. (Ympäristöministeriö 2011a)

E-luku ei ole puhtaasti energiatehokkuuden eikä ympäristötehokkuuden indikaattori, vaan jotain tältä väliltä. Tämä on seurausta siitä miten E-luvun energiamuotojen kertoimet on valittu. Energiamuotojen kertoimien määrittämiseen on vaikuttanut primäärienergiakertoimen lisäksi energiamuodon hiilijalanjälki.

3.1.2 Energiatodistus (ET-luku)

Toinen viranomaisten käyttämä energiatehokkuuden indikaattori (ET-luku) esiintyy uusille rakennuksille pakollisessa energiatodistuksessa. Energiatodistus on pakollinen myös olemassa oleville rakennuksille myynnin tai vuokrauksen yhteydessä (pl. pientalot tai enintään kuuden asunnon asuinrakennukset). Energiatodistuksen tarkoitus on ohjata parantamaan rakennusten energiatehokkuutta sekä auttaa kiinteistönomistajia tunnistamaan energiatehokkuudeltaan hyvät ja huonot rakennukset. Lisäksi sen tarkoitus on tehdä energiatehokkuudesta valintakriteeri rakennusta ostettaessa ja vuokrattaessa. Energiatodistuksia on kolme erilaista: pienille asuinrakennuksille, muille rakennuksille sekä isännöitsijätodistukseen sisältyvä energiatodistus. Energiatodistus on voimassa pienille asuinrakennuksille 10 vuotta ja muille rakennuksille 4 vuotta. Uudisrakennukselle energiatodistuksen antaa pääsuunnittelija, kun taas olemassa olevalle rakennukselle sen antaa erillinen energiatodistuksen antaja. Isännöitsijätodistukseen sisältyvän energiatodistuksen antaa isännöitsijä tai taloyhtiön hallituksen puheenjohtaja. (Ympäristöministeriö 2009b)

ET-luku on rakennuksen tarvitsema vuotuinen energiamäärä jaettuna sen bruttopinta-alalla (kWh/m^2). Rakennuksen tarvitsema energiamäärä voidaan selvittää joko laskennallisesti tai toteutuneesta ostoenergiankulutuksesta. ET-luvun laskennassa ei oteta huomioon eri energiamuotoja. Rakennuksen tarvitsemaa lämpöenergiaa laskettaessa ei oteta huomioon myöskään kiinteistökohtaisen lämmöntuoton häviöitä. Näin rakennuksen ostoenergia voi poiketa paljonkin ET-luvun laskennassa käytetystä vuotuisesta energiantarpeesta. Käytettäessä toteutunutta ostoenergiankulutusta, kiinteistökohtaisen lämmöntuotannon hyötysuhde on siis huomioitava, jotta saadaan ET-luvun laskennassa käytetty lämmitysenergiankulutus $Q_{\text{lämmitys}}$ (kts. Kuva 7). (Ympäristöministeriö 2009b)



Kuva 7 Taseraja ET-luvun laskennassa (Ympäristöministeriö 2009b)

ET-luvun laskennassa käytetään vielä vanhoja testivuoden 1979 säätietoja. ET-luvun lasketaan käyttäen säävyöhykkeen III (Jyväskylä-Luonetjärven säähavaintoasema) tietoja riippumatta rakennuksen maantieteellisestä sijainnista. Tämä tehdään, jotta energia-

todistuksien tiedot olisivat vertailukelpoisia keskenään. Käytettäessä toteutunutta os-toenergiankulutusta ET-luvun laskennassa, käytetään vertailukelpoisuuden vuoksi paikakuntakohtaisia sääkorjauskertoimia. Pienille asuinrakennuksille ET-luvun laskennassa tulee käyttää aina SRMK D5:ssä esitettyä kuukausitason menetelmää. Muille rakennuksille voidaan halutessa käyttää myös muita laskentamenetelmiä. (Ympäristöministeriö 2009b)

ET-luvun perusteella rakennukset jaetaan luokkiin A–G, joista A-luokka on vähiten kuluttava. Luokkien ET-lukuvaatimukset riippuvat rakennuksen käyttötarkoituksesta. Pienillä asuinrakennuksilla luokkavaatimukset ovat lievempiä kuin muilla rakennuksilla. Pientalolla A-luokkaan pääseminen edellyttää ET-lukua, joka on pienempi kuin 150 kWh/m^2 . A-luokkaisen toimistorakennuksen ET-luku taas tulee olla alle 90 kWh/m^2 .

ET-luku on indikaattori, joka kuvaa kokonaisenergian loppukäytön tehokkuutta rakennuksissa. ET-luku ei ole optimaalinen indikaattori primäärienergian käytön tehokkuudelle eikä ympäristötehokkuudelle, sillä se ei huomioi eri energiamuotojen erisuuruisia primäärienergiakertoimia tai hiilijalanjälkiä. Energiatodistuslaki on kuitenkin jo muuttunut. Kevään 2013 aikana energiatodistus tulee muuttumaan niin, että ET-luvun korvaa SRMK D3:ssa E-luku. Energiatehokkuuden määrittely tehdään jatkossa olemassa oleville rakennuksillekin aina laskennallisesti. Tätä ei siis voi tehdä enää todellisen kulutuksen pohjalta. Olemassa olevan rakennuksen energiatodistuksen laatiminen edellyttää jatkossa sitä, että todistuksen laatija käy itse tutustumassa kohteeseen. Tällöin energiatodistuksen pitää myös aina sisältää suosituksia energiatehokkuuden parantamiseksi silloin, kun ne ovat teknisesti ja taloudellisesti mahdollisia. Myös rakennusten luokittelusteikot muuttuvat vastaamaan energiamuotojen kertoimilla kerrottua energiankulutusta. (Ympäristöministeriö 2013)

3.2 Yksityisen sektorin käyttämät mittarit (Värkki-projekti)

Suomessa ei yksityisellä sektorilla ole aikaisemmin ollut yhtenevää käytäntöä rakennusten ympäristötehokkuuden mittaamiselle ja kiinteistöjen ympäristöjohtamiselle. Jotkut toimijat ovat tosin käyttäneet kansainvälisiä ympäristöluokitusjärjestelmiä (esim. LEED ja BREEAM). Mikään näistä luokitusjärjestelmistä ei ole kuitenkaan saavuttanut niin merkittävää jalansijaa Suomessa, että sitä voitaisiin pitää kansallisena ”standardina”. Tämä johtuu osittain siitä, että mikään näistä kansainvälisistä luokitusjärjestelmistä ei täysin sovi Suomessa vallitseviin olosuhteisiin. Esimerkiksi LEED painottaa Suomen kannalta ylimäärin vedenkulutusta (Suomessa ei liioin ole ollut pulaa puhtaasta vedestä). Mitään näistä luokitusjärjestelmistä ei ole päätetty kansallistaa Suomessa (Virta 2012).

Värkki-projekti (Vähähiilisen kiinteistö- ja rakennusalan ydinindikaattorit) käynnistettiin vuonna 2011. Projektia johti Green Building Council Finland (FIGBC) ja sen rahoittajana toimi Suomen itsenäisyyden juhlarahasto, Sitra. FIGBC on järjestö, jonka tarkoitus on edistää ympäristötehokasta rakentamista ja tuoda kestävä kehityksen näkökulmaa jokapäiväiseen ympäristöjohtamiseen. FIGBC:n jäsenenä 88 suomalaista rakentamisen kanssa tekemisissä olevaa yritystä (Green Building Council Finland 2013a). Värkki-projektin tavoitteena oli kiinteistö- ja ympäristöjohtamisen yhtenäistäminen luomalla yhteiset ydinindikaattorit kiinteistöjen ympäristötehokkuuden arvioimista varten. On huomioitava, että vaikka projektissa puhutaankin indikaattoreista, käsiteltävät

suureet ovat ensisijaisesti mittareita, jos käytetään tämän luvun alussa esiintyviä määritelmiä termeille mittari ja indikaattori. Tavoitteisiin kuului, että mittarit ovat yksinkertaisia, selkeitä sekä laskettavissa yksikäsitteisesti. Lisäksi mittarit ja laskentaohjeet tulee olla julkisia ja kaikkien saatavilla (Virta 2012).

Projekti saatiin päätökseen vuoden 2013 alussa. Tuloksena syntyi useita rakennuksen ympäristötehokkuuden mittareita. Mittarit on jaettu hanke- ja käyttövaiheen mittareihin. Hankevaiheen mittarit ovat E-luku (kts. kohta 3.1.1), Elinkaaren hiilijalanjälki (kts. luku 6), elinkaarikustannus ja sisäilmaluokka (kts. kohta 4.2.2). Käyttövaiheen mittareita taas ovat energiankulutus, käytön hiilijalanjälki, pohjateho sekä sisäympäristöön tyytyväisten osuus. Hankevaiheen mittareita (pl. elinkaarikustannus) on käsitelty muissa työn osioissa. Seuraavaksi käsitellään siis näitä neljää käyttövaiheen mittaria. Luvun lopuksi käsitellään vielä lyhyesti projektissa esitettyä kiinteistöpassia. (Green Building Council Finland 2013b)

3.2.1 Energiankulutus

Energiankulutus kertoo rakennukseen ulkopuolelta tuodun energian määrän. Mukaan ei siis lueta kiinteistön itsensä tuottamaa omavaraisenergiaa. Toisin kuin E-luvussa energiamuotoja ei kuitenkaan painoteta kertoimilla. Mukaan luetaan siis kaukolämpö ja –jäähdytys, käytetyt polttoaineet sekä sähkö. Polttoaineiden kohdalla mukaan luetaan myös kiinteistökohtaisen energiantuotannon häviöt. Tämä kannustaa uusimaan tai huoltamaan energiaa tuottavat laitteet. Näin kohdellaan myös niitä tapauksia, joissa erillisen energiantuottajan laitteisto palvelee ainoastaan tarkasteltavaa kiinteistöä. Kauko- tai aluelämmössä otetaan kuitenkin huomioon vain tarkasteltavaan kiinteistöön toimitettu energia. (Green Building Council Finland 2013b)

Sähkön osuus energiankulutuksesta jaetaan kiinteistö- ja käyttäjäsähköön. Jos mittari lasketaan kiinteistölle, ei huomioida käyttäjäsähkön kulutusta. Käyttäjän kulutusta tarkasteltaessa ei taas huomioida kiinteistön kuluttamaa energiaa kokonaisuudessaan. Kiinteistösähköksi luetaan mm. talotekniikan, kiinteän valaistuksen, hissien, kiinteistösaunojen ja tontin valaisemisen sähkönkulutus. Käyttäjäsähköä taas on käyttäjien toiminnassa kuluva sähkö, kuten tietokoneiden, kylmälaitteiden ja pesukoneiden käyttämä sähkö. Asunnoissa käyttäjäsähköksi luetaan myös valaistuksen ja asunnoissa sijaitsevien saunojen sähkönkulutus. Mikäli rakennuksessa ei ole käyttäjäsähköä mittaroitu erikseen, käyttäjäsähkön kulutuksen oletetaan olevan nolla. Tämä voi olla asian laita etenkin vanhoissa toimistorakennuksissa. Käyttäjän energiankulutuksessa on mukana käyttäjän osuus kiinteistön energiankulutuksesta. Tämä osuus lasketaan yleensä vuokrapinta-alan mukaan ainakin niissä tapauksissa, joissa koko kiinteistön käyttö on yhdenmuukaista. Tuloksia raportoidessa tulee ilmoittaa selkeästi, onko kyseessä kiinteistön vai käyttäjän energiankulutus. (Green Building Council Finland 2013b)

Mitattuun lämmitysenergian kulutukseen on hyvä tehdä sääkorjaus vaihtelevien sääolojen vaikutuksen poistamiseksi. Sääkorjaus koskee vain tilojen lämmitykseen käytettyä energiaa, sillä käyttöveden lämmitysenergian määrä ei merkittävästi riipu sääoloista. Mikäli lämpimän käyttöveden kulutusta ei ole saatavissa, käytetään oletusarvona asuinrakennuksille 40 % veden kokonaiskulutuksesta ja muille rakennuksille 30 % veden kokonaiskulutuksesta. Jos sääkorjausta on käytetty energiankulutuksen laskennassa, ilmoitetaan tämä raportoinnissa energiankulutuksen lukuarvon yhteydessä. Sääkorjattu

lämmitysenergian kulutus lasketaan seuraavasti. (Green Building Council Finland 2013b)

$$Q_{norm} = \frac{S_{N,kunta}}{S_{toteutunut,kunta}} * Q_{lämmitys,tilat} + Q_{lämmitys,vesi}, \quad (2)$$

jossa

$S_{N,kunta}$	Normaalivuoden lämmitystarveluku paikkakunnalla, Kd
$S_{toteutunut,kunta}$	Toteutunut lämmitystarveluku paikkakunnalla, Kd
$Q_{lämmitys,tilat}$	Toteutunut tilojen lämmitysenergiankulutus, kWh/a
$Q_{lämmitys,vesi}$	Toteutunut lämpimän käyttöveden energiankulutus, kWh/a.

(Green Building Council Finland 2013b)

Energiankulutus on melko selkeä mittari, joka mittaa rakennuksen kokonaisenergiankulutusta tekemättä eroa eri energiamuotojen välillä. Pelkkä energiankulutus ei kuitenkaan ole paras mahdollinen mittari ympäristö- tai kustannustehokkuudelle, koska se ei huomioi eri energiamuotojen erilaisia päästö- ja primäärienergiakertoimia eikä niiden erisuuruisia hintoja.

3.2.2 Käytön hiilijalanjälki

Käytön hiilijalanjälki on mittari, joka mittaa rakennuksen käytöstä aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä. Mukaan eivät siis kuulu ne päästöt, jotka syntyvät ennen rakennuksen käyttöönottoa tai käytön lopettamisen jälkeen. Suurimman osan käytön hiilijalanjäljestä muodostaa energiankulutus. Mittari onkin voimakkaasti kytköksissä energiankulutusmittarin kanssa. Käytön hiilijalanjälkeen saadaan pakollisia tietoja energiankulutusmittarista. Tarkasteluaika tässä mittarissa on yksi vuosi, kuten energiankulutuksessakin. Mittari koostuu pakollisista ja vapaaehtoisista osista. Värkki-projektissa käytön hiilijalanjäljen perustaksi valittiin Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol), joka on kansainvälisesti käytössä oleva työkalu organisaation hiilijalanjäljen mittaamiseen ja hallintaan. GHG Protocol valittiin, koska se soveltuu hyvin kiinteistöissä käytettäväksi ja on jo käytössä Suomessa. (Green Building Council Finland 2013b)

Käytön hiilijalanjäljessä pakolliset huomioitavat päästölähteet ovat kaukolämpö, kaukojäähdytys, lämmitykseen käytetyt polttoaineet, kiinteistösähkö ja käyttäjäsähkö. Haluttaessa voidaan huomioida lisäksi jätehuolto, suorat kylmäainepäästöt, yrityksen omistamien ajoneuvojen polttoaineet, muiden kuin yrityksen omistamien ajoneuvojen polttoaineet (mm. liikematkojen ja palveluiden päästöt) sekä rakennuksen ylläpitopalvelut. Käytön hiilijalanjäljessä käytetty sähkö voidaan laskea vihreänä sähkönä tietyin edellytyksin. Myytyyn sähköön ei esimerkiksi saa sisältyä ydinvoimaa. Tuotantolaitokset joista sähkö hankitaan, tulee olla päästökaupan ulkopuolella. Lisäksi vihreän sähkön tulee kattaa koko kohteen kysyntä. Käytön hiilijalanjälkeä laskettaessa kaikkien käytettävien tietojen tulee ensisijaisesti perustua mittauksiin tai laskutukseen. Jos joitain tietoja on jouduttu arvioimaan, tulee tämä ilmoittaa sekä esittää selkeästi, miksi näin on toimittu. (Green Building Council Finland 2013b)

Käytön hiilijalanjälki voidaan laskea joko kiinteistön omistajan tai käyttäjän näkökulmasta. Näkökulma vaikuttaa siihen, mitä kaikkea mittariin lasketaan mukaan. Laskettaessa käytön hiilijalanjälkeä omistajan näkökulmasta mukaan luetaan kaikki muut pääs-

tölähteet paitsi käyttäjästä. Käyttäjän näkökulmasta laskettuna vuorostaan luetaan käyttäjästä mukaan kokonaisuudessaan. Muista päästölähteistä lasketaan käyttäjälle jyvitetty osuus. Jyvitys tehdään yleensä vuokratun pinta-alan perusteella, kuten energiankulutuksessakin. (Green Building Council Finland 2013b)

Sääkorjausta käytetään myös käytön hiilijalanjäljessä. Sääkorjauksen käyttäminen kuitenkin riippuu siitä, mihin tarkoitukseen mittaria käytetään. Jos on kyse julkisesta tiedottamisesta, ilmoitetaan aina todellinen mitattu tieto ilman sääkorjauksia. Tämä johtuu siitä, että julkisen tiedottamisen tavoitteena on yleensä ilmoittaa todellista kulutusta vastaava tulos. Sen sijaan, jos tarkoituksena on kulutustason seuranta tai oman toiminnan kehittäminen, on sääkorjausta mielekästä käyttää. Näin saadaan poistettua säävaihtelun vaikutus, jotta omistaja tai käyttäjä voi helpommin arvioida kiinteistön ympäristötehokkuuden kehittymistä käytön hiilijalanjäljen avulla. (Green Building Council Finland 2013b)

Käytön hiilijalanjälki on yksinkertainen ja selkeä rakennuksen ympäristötehokkuutta kuvaava mittari. Sitä voidaan käyttää omistajan ja/tai käyttäjän toiminnan seuraamiseen, parantamiseen sekä julkiseen tiedottamiseen. Käytön hiilijalanjälki on myös melko joustava mittari, sillä se sisältää pakollisten osien lisäksi useita vapaaehtoisia osia. Näin mittarin käyttäjä voi valita, kuinka laajasti hän haluaa käytön hiilijalanjäljen huomioida. Ongelmia voi aiheuttaa energiantuotannon päästökerrointen selvittäminen. Tämä voi olla ongelma etenkin kaukolämmön ja -jäähdytyksen kohdalla, sillä päästökertoimet tulee näiden energiamuotojen osalta hankkia paikallisilta energiantuottajilta.

3.2.3 Pohjateho

Pohjateho on mittari, joka kertoo kuinka paljon rakennus kuluttaa energiaa silloin, kun se ei varsinaisesti tuota mitään palveluja käyttäjilleen. Mittarin tarkoitus on karsia tuotamatonta kulutusta ja esimerkiksi väärin ajastettua talotekniikkaa. Mittarin nimi on pohjateho tyhjäkäyttötehon sijaan, koska jotkut rakennukset eivät ole koskaan tyhjiä, niin että varsinainen tyhjäkäyttöteho voitaisiin mitata. Tällaisia rakennuksia ovat mm. asunto-osakeyhtiömuotoiset asuinrakennukset. Tällöin pohjateho määritetään silloin, kun rakennuksen kuormitus on alimmillaan. (Green Building Council Finland 2013b)

Pohjatehon mittaaminen edellyttää, että rakennuksen sähköjärjestelmä on varustettu vähintään tuntitason mittauksella. Mittaus tehdään vähintään yhden viikon jaksolta ja tuloksena käytetään mittausjakson keskitehoa. Lämmitysenergiaa ei lasketa mukaan pohjatehoon, vaikka joissain tapauksissa onkin mahdollisuus saada tuntitason tietoa kaukolämmön tehoista. Jos on mahdollista, pohjateho mitataan silloin kuin tarkasteltava rakennus on tyhjiällä. Tavallisessa toimistorakennuksessa pohjatehoa voidaan mitata esimerkiksi arkisin klo 20:00–5:30 ja viikonloppuisin kellon ympäri. Asuinrakennuksessa mittausajankohta voi olla vaikka arkisin klo 10–14, jolloin suurin osa asukkaista on töissä tai koulussa. Mittausta ei tule suorittaa silloin, kun päällä on ajastettuja talotekniikan toimintoja. Tällaisia ajastettuja toimintoja ovat mm. varastoon lämmittäminen sekä yöviilennyksen tuottaminen. Pohjatehoa selvittäessä tulee huomioida myös vuodenajasta riippuva kuormituksen vaihtelu (esim. sulatus- ja autolämmitykset, ulkova-laistus ja yötuuletus). Vuodenaikojen aiheuttama vaihtelu tuloksissa voidaan pyrkiä eliminoidaan toistamalla mittaukset eri vuodenaikoina. Pohjateho voidaan laskea tarpeen mukaan kiinteistö-, käyttäjä- tai kokonaissähkölle. Käyttäjäsähköön pohjakulutus koostuu mm. sammutettujen pistorasioihin kytkettyjen laitteiden peruskulutuksesta sekä

aina päällä pidettävien laitteiden kulutuksesta (esim. kopiokoneet useissa toimistoissa). Mitatusta pohjatehosta lasketaan rakennukselle vuotuinen pohjakulutus. Tämä tehdään kertomalla pohjateho vuoden tuntimäärällä (8760 h). Rakennukselle voidaan myös laskea vuotuinen tyhjäkäyttökulutus kertomalla pohjateho rakennuksen tyhjäkäyttöajalla (ts. ajalla jolloin rakennus ei tuota palveluita). (Green Building Council Finland 2013b)

Pohjateho on kätevä mittari, kun halutaan vähentää tuottamatonta kulutusta rakennuksessa. Mittarista on myös apua talotekniikan ohjausta ja ajastusta säädettäessä. Pohjatehon mittaaminen vaatii kuitenkin vähintään tuntitason mittauksella varustetun sähköjärjestelmän rakennuksesta. Tämä vuoksi pohjateho mittaria ei voida käyttää kaikissa vanhoissa rakennuksissa. Ongelmia voi aiheuttaa myös pohjatehon tulkinnanvaraisuus. Voi olla hankala määritellä, mikä on se aika, jolloin rakennuksessa ei tuoteta lainkaan palveluita. Lisäksi ongelmia voi aiheuttaa kulutuksen kohdentaminen palveluita tuottavan ja tuottamattoman ajan välillä. Näistä ongelmista huolimatta pohjateho antaa vähintään likimääräistä tietoa rakennuksen pohjakulutuksesta ja soveltuu siksi energiatehokkuuden mittariksi täydentämään edellä esitettyjä mittareita.

3.2.4 Sisäympäristöön tyytyväiset

Sisäympäristöön tyytyväisten käyttäjien osuus esitellään tässä yhteydessä, vaikka se ei olekaan energiatehokkuuden mittari. Se kuitenkin kuvaa rakennuksen käytönajan suori-tuskykyä aivan kuten kolme edellä esitettyä mittaria. Tässä mittarissa käyttäjien kokemus rakennuksen sisäympäristöstä selvitetään käyttäjätyytyväisyyskyselyllä. Kysely kattaa seuraavat osa-alueet: 1. Lämpöviihtyisyys jäähdytyskaudella (kesällä), 2. Lämpöviihtyisyys lämmityskaudella (talvella), 3. Huoneilman laatu (hajut, tunkkaisuus), 4. Valaistusolosuhteet, 5. Ääniolosuhteet (meluisuus, akustinen yksityisyys). Vastausvaihtoehdot ovat +3 erittäin tyytyväinen, +2 tyytyväinen, +1 osittain tyytyväinen, 0 neutraali, -1 osittain tyytymätön, -2 tyytymätön ja -3 erittäin tyytymätön. Tarvittaessa tyytymättömyyden syitä voidaan selvittää tarkemmin joko ennalta laadituilla lisäkysymyksillä tai antamalla käyttäjien kertoa ongelmista vapaamuotoisesti. Mikäli tyytymättömyys (-1...-3 vastausten osuus kaikista vastauksista) jonkin osa-alueen kohdalla on suurempi kuin 25 %, tulee ongelmien syyt selvittää tarkemmin sisäilmastokatselmuksella. Tarvittaessa tulee suorittaa myös mittauksia. Mittarin varsinainen tulos saadaan laskemalla keskiarvo kaikista osa-alueista. Mittarin tulosta laskettaessa, myös vastaus 0 lasketaan tyytyväisten piiriin. Tavoite sisäympäristöön tyytyväisten käyttäjien osuudelle on 75 %. Tarkoitus on kartoittaa käyttäjien kokemusta sisäympäristöstä pitkällä aikavälillä, tasaisin väliajoin tehtävillä kyselyillä. (Green Building Council Finland 2013b)

Sisäympäristöön tyytyväisten osuus antaa melko hyvän kuvan sisäympäristön viihtyisyydestä ja terveellisyydestä asunnossa. Mittari soveltuu ylläpidon tavoitteiden asettamiseen ja seurantaan sekä omistajan ja vuokralaisen väliseen kommunikaatioon. Se soveltuu myös arvioimaan tilojen sopivuutta mahdolliselle vuokralaiselle. Sillä voidaan myös arvioida kiinteistön omistajan tarjoamien palveluiden laatua. Ongelmia mittarissa voi aiheuttaa sen riippuvuus ihmisten subjektiivisesta kokemuksesta. Näin ollen samantyyppisellä sisäympäristöllä voidaan saada erilaisia tuloksia riippuen mm. käyttäjien hetkellisestä mielialasta. Tämä ongelma on sitä pienempi, mitä suurempi otos kyselyllä on. Pienillä otoksilla tulos voi heitellä paljonkin, esimerkiksi sen mukaan minkälaisissa olosuhteissa käyttäjät ovat aikaisemmin työskennelleet. Säännöllisten kyselyiden järjestäminen voi myös osoittautua työlääksi. (Green Building Council Finland 2013b)

3.2.5 Kiinteistöpassi

Kiinteistöpassi on Värkki-projektissa kehitetty työkalu, josta rakennuksen ympäristömittareiden tulokset löytyvät helposti yhdestä paikasta. Kiinteistöpassi on samankaltainen konsepti kuin lain mukaan pakollinen energiatodistus. Passin tarkoitus on antaa läpinäkyvästi tietoa rakennuksen suorituskyvystä ja ympäristövaikutuksesta. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi sidosryhmäviestinnässä tai asetettujen tavoitteiden toteutumisen seurannassa. Se voi toimia myös kriteerinä kiinteistö osto- tai myyntitilanteissa. (Green Building Council Finland 2013b)

Kiinteistöpassit laaditaan erikseen hanke- ja käyttövaiheen mittareille. Passi sisältää ensinnäkin rakennuksen perustiedot, kuten osoitteen, käyttötarkoituksen, rakennusvuoden, bruttoalan ja pysäköintiratkaisun. Käyttövaiheen kiinteistöpassi sisältää lisäksi seurantavuoden, jolle ilmoitetut mittarit on esitetty. Käyttövaiheen kiinteistöpassi sisältää tulokset jokaisesta neljästä käyttövaiheen mittarista, energiankulutuksesta, käytön hiilijalanjäljestä, pohjatehosta ja sisäympäristöön tyytyväisistä (kts. Kuva 8). (Green Building Council Finland 2013b)

Kiinteistöpassi		KÄYTTÖVAIHE
NIMI	EDUSKUNTATALO	
Osoite	Mannerheimintie 30, 00100 Helsinki	
Käyttötarkoitus	kokous-, hallinto-, ja toimistorakennus	
Rakennusvuosi	1931	
Bruttoala	17 200 m ²	
Pysäköintiratkaisu	Pysäköintihalli	
Yksityiskohtaiset tiedot	www.figbc.fi	
KÄYTÖNAJAN MITTARI	TUNNUSLUKU	
Seurantavuosi	2014	
Energiankulutus	3 213 600 kWh	
Käytön hiilijalanjälki	540 000 kg CO ₂ e	
Pohjateho	85 kW	
Käyttäjätyytyväisyys	72 %	

MALLIKAPPALE, LUVUT EIVÄT OLE TODELLISIA

GREEN
BUILDING
COUNCIL
FINLAND

Kuva 8 Esimerkki Kiinteistöpassista (luvut eivät ole todellisia) (Green Building Council Finland 2013b)

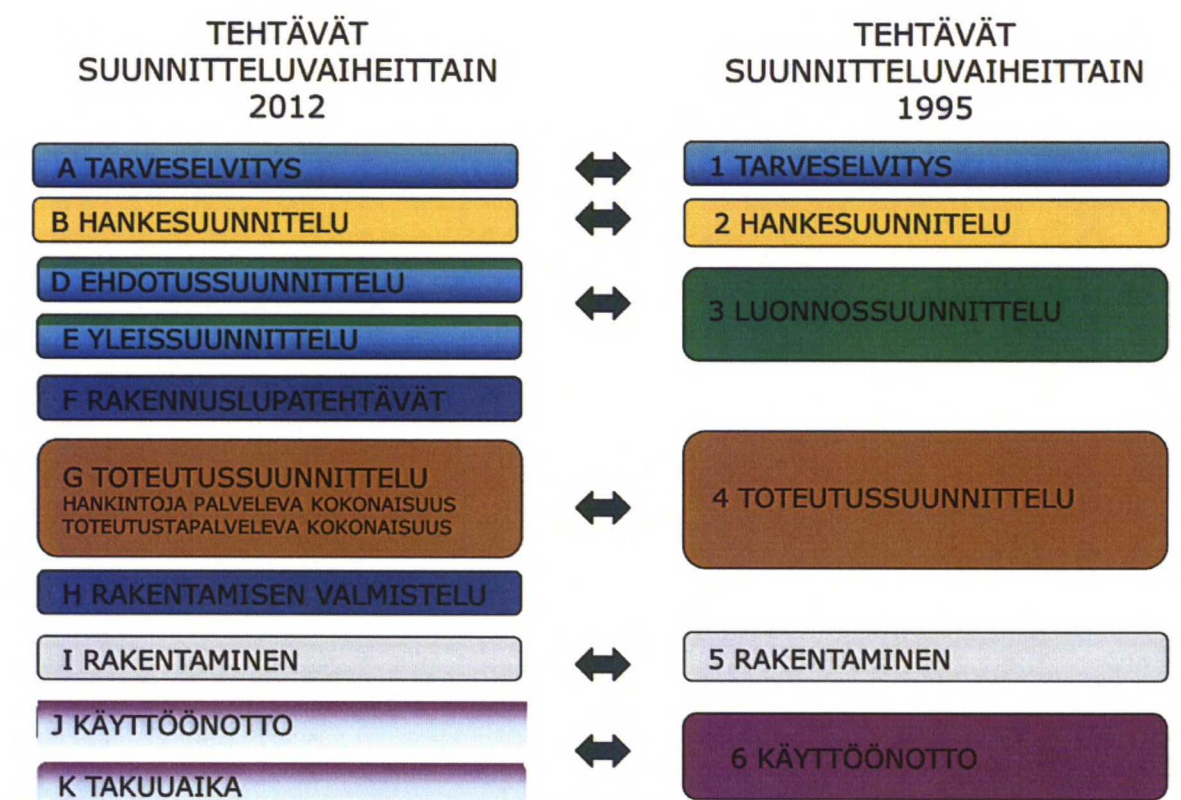
4 Rakentamisen suunnitteluprosessi

Energia- ja ympäristötehokkaan suunnittelun ja rakentamisen mahdollistaa hyvin toimiva suunnitteluprosessi. Tämän prosessin tulee mahdollistaa energia- ja ympäristöasioiden huomioonottamisen kaikissa suunnittelun vaiheissa. Rakennushankkeen eri osapuolten välisen kommunikaation ja yhteistyön tulee myös sujua moitteettomasti. Siksi tässä luvussa käsitellään yleisesti rakennushankkeen suunnitteluprosessia sekä sen päätöksentekoa ohjaavia asioita. Aluksi käydään läpi suunnitteluprosessin vaiheet sekä suunnitteluprosessin päätöksentekoa ohjaavista asioista rakennusmääräykset ja sisäilmastoluokitus. Tämän jälkeen käsitellään eri suunnittelualoja sekä näiden alojen vastualueita ja vaikutusmahdollisuuksia rakennuksen hiilijalanjälkeen. Lopuksi pohditaan vielä, miten voidaan varmistaa elinkaarisuunnittelun toteutuminen rakennushankkeessa sekä miten itse rakennushanketta voitaisiin kehittää elinkaarisuunnittelun kannalta suotuisammaksi.

4.1 Suunnitteluprosessin vaiheet

Kyky vaikuttaa hankkeen päätöksiin ja tätä kautta myös rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen on suurin heti hankkeen alkuvaiheessa ja pienenee hankkeen edetessä ja suunnitelmien tarkentuessa. Ympäristötehokkaan rakennuksen rakentaminen edellyttääkin ympäristöasioiden huomioonottamista kaikissa rakennushankkeen vaiheissa jo aivan alusta lähtien. Rakennushanke koostuu tarveselvityksestä, hankesuunnittelusta, rakennussuunnittelusta, rakentamisesta ja käyttöönotosta (RT 10-10387 1989). Suunnitteluprosessissa vaihejako on kuitenkin tätä tarkempi. Perinteisesti suunnitteluprosessi on jaettu vaiheisiin tarveselvitys, hankesuunnittelu, luonnossuunnittelu (vaiheet L1 ja L2), toteutussuunnittelu, rakentaminen ja käyttöönotto. Suunnitteluprosessia ollaan kuitenkin uudistamassa vastaamaan paremmin nykyaikaista rakennusprosessia. Uudistuksessa on mukana useita merkittäviä rakennusalan toimijoita (mm. Arkkitehtitoimistojen liitto ATL ry, Asunto-, toimitila- ja rakennuttajaliitto RAKLI ry, Rakennusteollisuus RT ry, Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liitto SKOL ry). Uudistuksen taustalla ovat mm. muuttunut lainsäädäntö, elinkaarisuunnittelun ja ympäristöasioiden huomioon ottaminen sekä yleistynyt tietomallien käyttö suunnittelussa. Uudistusta on sysännyt eteenpäin myös vaihtoehtoisten urakkamuotojen yleistyminen rakennusprosessissa. Uusissa urakkamuodoissa suunnittelu- ja rakennusvaiheet tapahtuvat usein limittäin. Tällä pyritään vähentämään rakennushankkeeseen kuluvaa kokonaisaikaa. (RAKLI ry 2012)

Suunnitteluprosessin uusi vaihejako on seuraava: tarveselvitys, hankesuunnittelu, suunnittelun valmistelu, ehdotussuunnittelu, yleissuunnittelu, rakennuslupatehtävät, toteutussuunnittelu, rakentamisen valmistelu, rakentaminen, käyttöönotto, takuu aika (kts. Kuva 9). Seuraavaksi käsitellään niitä suunnitteluprosessin vaiheita, joissa tehdään suurimmat rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen vaikuttavat päätökset. (RAKLI ry 2012)



Kuva 9 Uudet ja vanhat suunnitteluprosessin vaiheet sekä niiden vastaavuus (RAKLI 2012)

Tarveselvitysvaiheessa todetaan, että tarve rakentamiselle on olemassa ja varmistetaan, että käytössä on pätevä henkilöstö. Määritellään rakennuksen toiminnalliset tavoitteet suhteessa käyttäjän tavoitteisiin ja kuvataan alustavasti tarvittavat tilat. Myös taloteknisten järjestelmien tavoitteet ja tilantarpeet määritellään alustavasti jo tässä vaiheessa. Lisäksi määritellään kestävä kehityksen tavoitteet rakennuksen elinkaarelle. Rakennuksen elinkaarisuunnittelu tulee siis aloittaa jo tarveselvitysvaiheessa, jos pyritään mahdollisimman pieneen elinkaaren hiilijalanjälkeen rakennuksessa. Tarveselvityksen päätteeksi laaditaan tarveselvitysraportti, jonka perusteella tehdään hankepäätös. (RAKLI ry 2012)

Hankesuunnitteluvaiheessa määritellään täsmälliset tavoitteet mm. rakennushankkeen laajuudelle, kustannuksille ja aikataululle. Arkkitehti määrittää tilojen mitoitusperusteet ja laatii huonetilaohjelman sekä huonekortit. Arkkitehti myös tekee hankkeelle elinkaarri- ja ympäristöselvityksen, jossa arvioidaan rakennuksen elinkaaren ympäristövaikutukset. Määritellään rakennuksen vaihtoehtoiset talotekniset järjestelmäratkaisut, jotka toimivat pohjana ehdotussuunnitteluvaiheen vaihtoehtotarkasteluille. Tässä vaiheessa selvitetään lisäksi mahdollinen rakennuspaikan hyödyntäminen energiankäytössä (esim. maa- tai aurinkolämpöratkaisut) sekä liittymismahdollisuudet sähkö-, lämpö-, jäähdytys- ja vesiverkostoihin. Hankesuunnitteluvaiheen tuloksena syntyy hankesuunnitelma, jonka perusteella tehdään investointipäätös. (RAKLI ry 2012)

Ehdotussuunnittelussa suunnittelijat laativat vaihtoehtoiset ehdotussuunnitelmat valittujen tavoitteiden täyttämiseksi. Arkkitehdit hahmottelevat erilaisia tontinkäyttövaihtoehtoja sekä hahmottelevat rakennuksen jakautumisen kerroksiin, osastoihin ja alueisiin.

Lisäksi laaditaan ehdotukset rakennuksen muodosta ja julkisivuista sekä niiden materiaaleista. Ehdotussuunnitteluvaiheessa voidaan myös jo pohtia mitä varauksia tulevaisuuden käyttöä varten rakennukseen halutaan sisällyttää. Varaukset voivat koskea esimerkiksi taloteknisten järjestelmien lisäämistä tai itse rakennuksen laajentamista sen käyttöönoton jälkeen. Tässä vaiheessa tehdään myös ensimmäinen energiankulutuksen laskenta käytettävissä olevilla tiedoilla. Myös alustava sisäilmaolosuhte- ja valaistuslaskenta toteutetaan. Tehdään tarkemmat vaihtoehtotarkastelut rakennuksen teknisille järjestelmille. Ehdotussuunnitteluvaiheen tuloksena valitaan hyväksytty ehdotussuunnitelma jatkokehitystä varten. (RAKLI ry 2012)

Yleissuunnitteluvaiheessa valittu ehdotussuunnitelma kehitetään toteutuskelpoiseksi. Tässä vaiheessa suunnitellaan mm. alueen käyttö, liikenneratkaisut ja rakenteet periaate- tasolla. Suunnitellaan rakennuksen julkisivu, siihen kuuluvat rakenteet sekä tekninen varustelu. Valituksi tulleet tulevaisuuden varaukset rakennukseen sisällytetään suunnitelmiin tässä vaiheessa. Ehdotussuunnitteluvaiheen energiankulutuksen ja sisäilmaolosuhteiden laskentoja tarkennetaan, sillä tietoa on nyt enemmän käytettävissä. Talotekniikan osalta esitetään reittitarpeet ja tyyppitilojen ratkaisuvaihtoehdot sekä tarkennetaan investointikustannuslaskelmaa. Myös elinkaarikustannuslaskenta laaditaan tässä vaiheessa. Arvioidaan rakennuksen ympäristövaikutukset ja mahdollisesti toimitetaan materiaali ympäristöluokittajille (esim. LEED). Lisäksi sovitetaan yhteen eri suunnittelualojen yleissuunnitelmat. Yleissuunnitteluvaiheen tuloksena saadaan hyväksytty yleissuunnitelma sekä pääpiirustukset. Viimeistään yleissuunnitteluvaiheen jälkeen suurin osa suurista rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen vaikuttavista päätöksistä on lyöty lukkoon. Sen vuoksi elinkaaritarkastelut, kuten hiilijalanjäljen laskennat tulee tehdä jo ennen yleissuunnitteluvaihetta. (RAKLI ry 2012)

Toteutussuunnitteluvaiheessa hyväksytty yleissuunnitelma kehitetään rakentamisen mahdollistavaksi mitoitetuksi toteutussuunnitelmaksi. Toteutussuunnitelma sisältää myös tuotemäärittelyt, jotta voidaan tehdä tarvittavat hankinnat. Tässä suunnittelun vaiheessa viimeistään luodaan tietomalli, mikäli kyseessä on mallinnusprojekti. Myös kaiken talotekniikan sisältävä yhdistelmämalli luodaan ja tarkastetaan sen avulla suunnitelmien yhteensopivuus. Aikaisemmin tehtyjä laskentoja (energiankulutus, investointi- ja elinkaarikustannukset, sisäilmaolosuhteet) tarkennetaan vastaamaan toteutussuunnitelmien tarkkuustasoa. LVI-tekniikan osalta tehdään painehäviö-, tasapainotus- ja äänilaskelmat. Näin saadaan mm. venttiilien ja säätöpeltien esisäätöarvot suunnitelmiin. Tämän vaiheen päätteeksi saadaan hyväksytty toteutussuunnitelma. Toteutussuunnitteluvaiheessa ei voida enää yleensä vaikuttaa rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen kannalta merkittäviin asioihin. Esimerkiksi rakennuksen muoto, suuntaus, lämmitysmuoto ja rakenneratkaisut on jo lyöty lukkoon ennen toteutussuunnitteluvaihetta. Energiat-hokkuutta voidaan toki edelleen jonkin verran parantaa paikallisilla ratkaisuilla.

Toteutussuunnitteluvaiheen jälkeen alkaa rakentamisvaihe, joka päättyy rakennuksen käyttöönottoon. Rakennus- ja käyttöönottovaiheiden aikana todennetaan asetettujen tavoitteiden toteutuminen tai pohditaan miksi osa tavoitteista jäi toteutumatta. Nykyaikaisessa rakennushankkeessa suunnittelijoiden tulisi olla aktiivisesti mukana myös toteutussuunnittelun jälkeisissä vaiheissa varmistamassa suunnittelun tavoitearvojen toteutuminen käytännössä. Jos suunnittelutavoitteet eivät syystä tai toisesta ole toteutuneet, suunnittelijat voivat myös olla mukana selvittämässä syitä tähän ja korjaamassa tilannetta yhdessä rakennuttajan ja urakoitsijan kanssa.

4.2 Suunnitteluprosessin päätöksentekoa ohjaavat seikat

4.2.1 Rakennusmääräykset

Rakennusmääräykset ohjaavat suunnitteluprosessia alimmalla tasolla asettaen lakisääteisiä rajoituksia käytettävälle ratkaisuille. Suomen rakennusmääräyskokoelmassa erotetaan määräykset ja ohjeet. Määräykset ovat velvoittavia, joten niistä ei saa poiketa lainkaan. Rakennusmääräyksissä esitetyt ohjeet sitä vastoin eivät ole velvoittavia, vaan niistä voidaan poiketa, mikäli löydetään vastaava ratkaisu, joka täyttää asetetut määräykset. Esitettynä ohjeita kuitenkin on yleensä hyvä noudattaa, ellei ole erityistä syytä poiketa niistä. Määräykset koskevat lähes kaikkia Suomessa sijaitsevia rakennuksia. Tietyt erityiset rakennukset ovat kuitenkin vapautettu joidenkin määräysten noudattamisesta. Esimerkiksi energiatehokkuusvaatimuksista ovat vapautettuja loma-asunnot, joita ei ole suunniteltu kokovuotiseen käyttöön sekä ne rakennukset joissa määräysten noudattaminen vaikeuttaisi kohtuuttomasti käyttötarkoituksen mukaista toimintaa (esim. kasvihuoneet tai väestönsuojat). SRMK:ssa säädetään melko laaja-alaisesti useista erilaisista rakentamiseen liittyvistä asioista. Seuraavaksi käsitellään yleisluontoisesti sitä miten Suomen rakennusmääräyskokoelma ohjaa suunnitteluprosessin päätöksentekoa.

SRMK asettaa rajoituksia rakennuksen sisäolosuhteille. Rakennus on suunniteltava ja rakennettava niin, että siellä on tavanomaisissa sääoloissa turvallinen, terveellinen ja viihtyisä sisäilmasto. Rajoituksia asetetaan mm. lämpö-oloille, äänitasoille, valaistustasolle sekä ilman epäpuhtauksien pitoisuuksille. Suunnittelussa on otettava huomioon sekä sisäiset että ulkoiset kuormitustekijät. Sisäisiä kuormitustekijöitä ovat esimerkiksi ihmisten aiheuttamat lämpö- ja kosteuskuormat sekä sisustusmateriaalien aiheuttamat päästöt. Ulkoisia kuormituksia aiheuttavat sää- ja ääniolot sekä ulkoilmaston laatu.

Määräyksiä on annettu runsaasti myös koskien taloteknisiä järjestelmiä. Järjestelmät on mitoitettava niin, että ne pystyvät tavanomaisten olosuhteiden vallitessa tuottamaan rakennuksen sisälle vaadittavat olosuhteet. Esimerkiksi lämmitysjärjestelmän kohdalla tämä tarkoittaa järjestelmän mitoittamista SRMK:ssa ilmoitettun mitoitusulkolämpötilan mukaan (Etelä-Suomessa -26 °C) (Ympäristöministeriö 2012). Taloteknisten järjestelmien ohjaus ja valvonta tulee myös onnistua ongelmitta. Lisäksi järjestelmät tulee suunnitella niin, että ne ovat puhdistettavissa ja huollettavissa. Esimerkiksi ilmanvaihdon kanavien kohdalla tämä tarkoittaa kanavien varustamista riittävällä määrällä puhdistusluukkuja.

Energiatehokkuuden ja hiilijalanjäljen kannalta tärkeitä määräyksiä ovat etenkin rakennuksen lämpöhäviöihin liittyvät määräykset. Lämpöhäviöistä on säädetty niin, että vaipan, vuotoilman ja ilmanvaihdon lämpöhäviöt eivät saa ylittää SRMK D3:ssa esiintyvillä vertailuarvoilla laskettua kokonaislämpöhäviötä. Vertailuarvot koskevat rakennuksen vaipan U-arvoja, ilmanvuotolukua ja ilmanvaihdon LTO:n vuosihyötysuhdetta. Alla on esitetty SRMK D3:ssa esiintyvät vertailuarvot rakennuksen vaipan U-arvoille. (Ympäristöministeriö 2012)

Taulukko 3 SRMK D3:n vertailuarvot rakennuksen vaipan U-arvoille (Ympäristöministeriö 2012)

Vaipan osa	U-arvo (W/m ² K)
seinä	0,17
yläpohja ja ulkoilmaan rajoittuva alapohja	0,09
ryömintätilaan rajoittuva alapohja	0,17
maata vasten oleva rakennusosa	0,16
ikkuna, kattoikkuna, ovi	1,0

Yksittäisen rakennuksen vaipan osa saa siis ylittää taulukossa esiintyvät arvot, kunhan rakennuksen kokonaislämpöhäviö jää vertailuarvoilla laskettua lämpöhäviötä pienemmäksi. Ikkunapinta-alan vertailuarvo on 15 % rakennuksen maanpäällisten kerrosalojen summasta, kuitenkin enintään 50 % rakennuksen julkisivun pinta-alasta. Vertailulämpöhäviötä laskettaessa käytetään rakennusvaipan ilmanvuotolukua 2,0 m³/h,m² ja LTO:n hyötysuhdetta 45 %. Edes yksittäisen vaipan osan U-arvo ei kuitenkaan saa ylittää arvoa 0,60 W/m²K. Ikkunan tai oven U-arvon taas täytyy olla alle 1,8 W/m²K. Edellä esitetyt luvut koskevat lämpimiä tiloja. Puolilämpimien tilojen vertailulaskelma tehdään erikseen eikä niiden U-arvovaatimukset ole yhtä tiukkoja kuin jatkuvaan oleskeluun tarkoitetuilla lämpimillä tiloilla. (Ympäristöministeriö 2012)

4.2.2 Sisäilmastoluokitus

Sisäilmastoluokitus on sisäilmaston tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset sisältävä luokitusjärjestelmä. Päätoimija sen takana on Sisäilmayhdistys ry ja päärahoittaja Ympäristöministeriö. Sisäilmastoluokituksen tavoite on edistää entistä terveellisempien ja viihtyisämpien rakennusten rakentamista toimimalla ohjaavana tekijänä rakennusten suunnittelulla, urakoinnille sekä rakennustarviketeollisuudelle. Nykyinen versio sisäilmastoluokituksesta julkaistiin vuonna 2008. Uusimmassa päivityksessä aiempaa luokitusta yksinkertaistettiin ja selvennettiin sekä yhdenmukaistettiin standardien kanssa. Kriteereiksi jäi vain keskeiset terveyteen ja viihtyvyyteen vaikuttavat suuret, joihin voidaan vaikuttaa suunnittelulla ja rakentamistavalla kohtuullisin kustannuksin. (Säteri 2008)

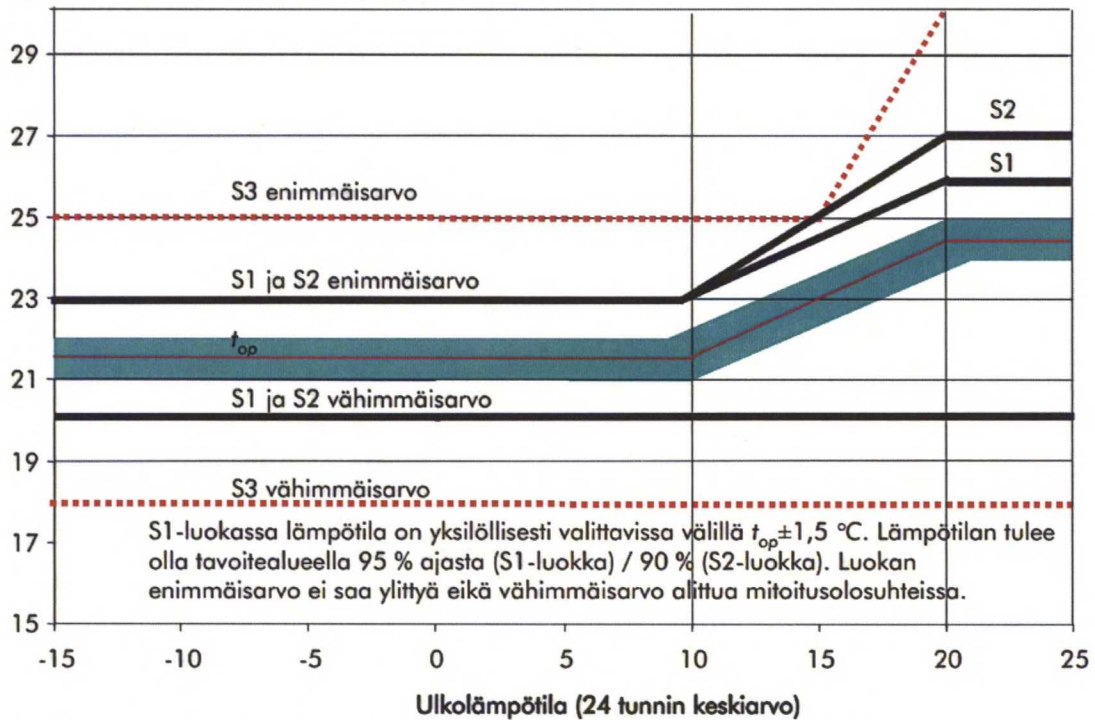
Luokituksen avulla hankkeen osapuolet voivat sopia selkeästi rakennuksen sisäilmaston tavoitteista ja pystyvät seuraamaan tavoitteiden toteutumista. Rakennuttaja valitsee hankkeen alussa tavoitearvot suunnittelijoiden kanssa. Tavoitteet kirjataan selkeästi kaikkien suunnittelijoiden tiedoksi ja esitetään suunnitteluasiakirjoissa. Kunkin suunnittelualan suunnittelijat huolehtivat tahollaan, että luokituksessa asetetut tavoitteet täyttyvät. Rakennuksen valmistumisen jälkeen tavoitteiden toteutuminen tarkastetaan eri sääkausien aikana (kesä-välikausi-talvi). Suunnittelun ja urakoinnin lisäksi luokitusta käytetään rakennustuoteollisuudessa (vähäpäästöisten rakennustuotteiden M1-luokka). Luokitusta voidaan lisäksi käyttää soveltuvin osin korjausrakentamisessa. Sisäilmastoluokitus on otettu laajalti käyttöön rakentamisessa ja se toimii ohjenuorana lähes kaikesa toimitilarakentamisessa. (Säteri 2008)

Sisäilmastoluokituksessa rakennusten sisäolot jaetaan kolmeen sisäilmastoluokkaan, S1, S2 ja S3. Korkein luokitus S1 tarkoittaa yksilöllistä sisäilmastoa, jossa sisäilman laatu on erittäin hyvä eikä tiloissa ole havaittavia hajuja. Lämpöolot ovat ympäri vuoden viih-

tyisät eikä haitallista vetoa tai ylikuumenemista esiinny. Lämpö- ja valaistusolosuhteita pystytään hallitsemaan yksilöllisesti. Lisäksi tiloissa on erittäin hyvät ääniolosuhteet. S2 luokka on hyvän sisäilmaston perustaso. Ilman laatu on hyvä eikä tiloissa ole häiritseviä hajuja. Vetoa ei yleensä esiinny, mutta ylikuumeneminen on mahdollista kuumina kesäpäivinä. Ääni- ja valaistusolosuhteet ovat hyvät. Alin S3 luokka takaa tyydyttävän sisäilmaston, joka täyttää SRMK:n minimivaatimukset. Tavoitteeksi voidaan valita joko halutun luokan kaikki arvot tai vaihtoehtoisesti kullekin kriteerille voidaan valita yksittelen halutut tavoitearvot eri luokista.

Sisäilmastoluokituksen 2008 kriteerit ovat operatiivinen lämpötila, ilman nopeus, hiilidioksidipitoisuus, radonpitoisuus sekä ääni- ja valaistusolosuhteet standardien SFS-EN 5907 ja SFS-EN 12464-1 mukaan. Operatiivisella lämpötilalla tarkoitetaan sitä tasalämpöisen ”mustan” tilan lämpötilaa, jossa kokonaislämpövirta (säteilyn ja konvektion summa) ihmisen kehon ja ympäröivän tilan välillä on sama kuin tarkasteltavassa tilassa (Seppänen 1996, s. 13). Operatiivinen lämpötila ottaa siis huomioon myös tilan pinnoista aiheutuvan säteilylämmönsiirron ja kuvaa siksi sitä miltä lämpötila ”tuntuu” paremmin kuin pelkkä ilman lämpötila tilassa. Sisäilmaluokkien ylä- ja alarajat operatiiviselle lämpötilalle riippuvat ulkoilman lämpötilasta. Silloin kun ulkoilma on lämpimämpää, myös sisäilman operatiivisen lämpötilan on sallittua nousta korkeammalle (kts. Kuva 10).

Operatiivinen lämpötila oleskeluvyöhykkeellä



Kuva 10 Operatiivisen lämpötilan ylä- ja alarajat sisäilmastoluokituksessa (Säteri 2008)

Ilman liikenopeudelle asetetun ylärajan tarkoitus on ehkäistä vedon tunnettu. Kyseinen yläraja riippuu sisäilman lämpötilasta niin että mitä viileämpää ilma on, sitä matalampi on suurin sallittu ilman liikenopeus. Hiilidioksi- ja radonpitoisuudelle asetetut ylärajat ovat luokkakohtaisista ja kiinteitä. Näille kriteereille on lisäksi asetettu pysyvyydasot. Tällä tarkoitetaan sitä, että esimerkiksi S1-luokan asunnoissa sisäilmaston tilan tulee

täyttää 90 % ajasta sille asetetut kriteerit. Pelkästään näiden kriteerien toteutuminen ei kuitenkaan riitä takaamaan tavoitteiden mukaista sisäilmastoa. Tilojen tulisi lisäksi täyttää S1- ja S2-luokille asetetut perusvaatimukset. Rakennus- ja IV-töiden tulee täyttää puhtausluokan P1 vaatimukset. Käytettyjen materiaalien ja iv-tuotteiden tulee kuulua lisäksi M1-luokkaan. Sisäilmastoluokitus sisältää myös tilojen ulkoilmavirtojen mitoitukset, jotka on tarkoitettu ohjeiksi suunnittelijoille. (Säteri 2008)

Sisäilmastoluokituksen tavoitearvoihin, etenkin S1-luokkaan pääseminen vaatii yleensä tavallista suurempia ilmavirtoja sekä jäähdytystehoja. Siksi luokitus asettaakin haasteen hyvän sisäilmaston ja hyvän energiatehokkuuden yhdistämiselle. Näiden näennäisesti ristiriitaisten asioiden yhdistäminen vaatii useiden eri asioiden huomioonottamista kaikissa suunnittelun ja rakentamisen vaiheissa. Lisäksi se vaatii kattavaa yhteistyötä suunnittelijoiden, rakennuttajan ja urakoitsijan välillä.

4.3 Suunnittelualat

Rakennushankkeen tyypillisimmät suunnittelualat ovat arkkitehtisuunnittelu, talotekninen suunnittelu ja rakennesuunnittelu. Kullakin suunnittelualalla on oma vastuualueensa, mutta eri suunnittelualoja edustavat suunnittelijat joutuvat myös tekemään runsaasti yhteistyötä rakennushankkeen aikana. Etenkin on tärkeää, että tieto eri suunnittelualojen välillä kulkee sujuvasti. Kaikilla suunnittelualoilla pystytään myös vaikuttamaan omalta osaltaan rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen. Seuraavaksi käsitellään yleisellä tasolla rakennushankkeen suunnittelualoja ja näiden vaikutusmahdollisuuksia rakennuksen hiilijalanjälkeen. Suunnittelualojen vastuualueita käsitellessä käytetään kohdassa 4.1 esitettyä uutta suunnitteluprosessin vaihejakoa ja siihen liittyviä tehtäväluetteloita. (RAKLI ry 2012).

Arkkitehti toimii yleensä rakennushankkeessa pääsuunnittelijana. Arkkitehdin tehtäviin kuuluu siksi useita rakennushankkeen koordinoimiseen liittyviä tehtäviä arkkitehtisuunnittelun lisäksi. Tällaisia tehtäviä ovat mm. rakennuslupa-asiat, ympäristöselvitykset ja alueen liikenne- ja viestintäsuunnittelu (RAKLI ry 2012). Pääsuunnittelijana arkkitehdin tehtävä on myös koordinoita yhteistyötä suunnittelualojen välillä sekä varmistaa suunnitelmien yhteensopivuus. Arkkitehdin suunnittelulla on hyvin suuri vaikutus rakennuksen energiatehokkuuteen ja hiilijalanjälkeen. Rakennuksen muoto, suuntaus, julkisivuratkaisut sekä ikkunoiden muoto, määrä ja koko ovat kaikki energiatehokkuuden merkittävästi vaikuttavia asioita, jotka kuuluvat arkkitehdin vastuualueeseen. Arkkitehdin työn vaikutus muiden suunnittelualojen työhön on kaikista suurin. Esimerkiksi tilavaraukset ja huonekorkeudet asettavat reunaehdot muille suunnittelualoille, etenkin talotekniikalle.

Talotekniikka (TATE) käsittää rakennuksen tekniset järjestelmät ja laitteet. Talotekniikalla on merkittävä vaikutus rakennuksen hiilijalanjälkeen, sillä taloteknisten järjestelmien käyttämä energia muodostaa lähes poikkeuksetta valtaosan rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljestä. Keskeisimmät osat talotekniikasta muodostaa LVI- ja sähköjärjestelmät sekä rakennusautomaatio. LVI-suunnittelijan päätöksillä on merkittäviä pitkäaikaisia vaikutuksia rakennuksen elinkaaren energiankulutukseen. Etenkin lämmitys- ja jäähdytysmuotojen valinnat näyttelevät tärkeää roolia rakennuksen energiankulutuksessa. Sähkösuunnittelussa energiankulutuksen kannalta merkittävin asia on yleensä valaistus, joka voi muodostaa toimistorakennuksen energiankulutuksesta jopa 20 %. Myös LVI-järjestelmät tarvitsevat sähköä, minkä vuoksi LVI- ja sähkösuunnittelijan yhteis-

työllä on suuri merkitys rakennushankkeen sujuvuuden kannalta. Rakennusautomaation tehtävä on varmistaa, että taloteknisten järjestelmien ohjaus ja tarkkailu onnistuvat vaivattomasti. Näin voidaan lisätä viihtyisyyttä sekä vähentää energian kulutusta. Rakennusautomaatiojärjestelmillä on merkittävä osa rakennuksen ylläpidossa, sillä ne tarjoavat tietoa mm. energiankulutuksesta ja olosuhteista rakennuksessa. Lisäksi ne ohjaavat taloteknisiä järjestelmiä luoden toimivat sisäolosuhteet sekä optimoiden järjestelmien energiankulutusta. Hyvin toimiva rakennusautomaatio on edellytys hyvin toimiville taloteknisille järjestelmille. Siksi yhteistyön sujuvuus rakennusautomaatiosuunnittelun ja muun taloteknisen suunnittelun välillä on tärkeää.

Rakennesuunnittelun tehtävä on etsiä arkkitehdin ratkaisuihin sopivat turvalliset, taloudelliset ja ympäristötehokkaat rakenteet. Rakennesuunnittelija voi myös avustaa arkkitehtia hänen suunnittelussaan niin, että saadaan aikaan rakenteellisesti järkevät ratkaisut. Tehtäviin kuuluu määrittää rakenteiden elinkaari- ja käyttöikätaavoitteet sekä toiminnalliset vaatimukset. On tärkeää varmistaa rakenteiden ääni- ja kosteustekninen toiminta. Jos hankkeessa ei ole erillistä geosuunnittelijaa, rakennesuunnittelijan tulee selvittää maan kantavuus, ja se miten rakennus paalutetaan. Rakennuksen hiilijalanjälkeen rakennesuunnittelija vaikuttaa etenkin vaipan lämpöhäviöiden kautta. Rakennesuunnittelijan tekemät ratkaisut määrittävät rakenteiden U-arvot. Tehtäviin kuuluu myös rakenteiden U-arvojen laskeminen, jotta LVI-suunnittelija voi laskea rakennuksen lämpöhäviöt ja mitoittaa rakennuksen lämmitysjärjestelmän. Rakennesuunnittelija vaikuttaa rakennuksen hiilijalanjälkeen myös valitsemalla rakenteissa käytetyt materiaalit. Rakennesuunnittelija voi omalta osaltaan vaikuttaa rakennuksen hiilijalanjälkeen pienentävästi, valitsemalla rakennemateriaaleja joiden valmistus tuottaa vain vähän kasvihuonekaasupäästöjä. (RAKLI ry 2012)

4.4 Elinkaarisuunnittelu

Rakennusten elinkaarisuunnittelu on suunnittelua, joka ottaa huomioon rakennuksen koko elinkaaren. Tarkastelujakso ulottuu siis suunnittelun aloittamisesta rakennuksen purkuun. Suunnittelussa tulee tällöin kiinnittää huomiota useampiin asioihin kuin perinteisessä suunnittelussa, jossa fokus on rakentamisen vaivattomuudessa ja investointikustannusten minimoimisessa. Elinkaarisuunnittelussa pitää pystyä arvioimaan tehtyjen päätösten vaikutuksia usein pitkälle tulevaisuuteen (jopa 100 vuoden päähän). Elinkaarisuunnittelu on usein monitavoiteoptimointia. Tavallisimmat suunnitteluratkaisuilla optimoitavat asiat ovat elinkaarikustannukset, rakennuksen käyttömukavuus ja sen ympäristötehokkuus. Erilaisissa hankkeissa näiden asioiden väliset painotukset ovat erilaisia. Siirtyminen perinteisestä suunnittelusta elinkaarisuunnitteluun vaatii luonnollisesti muutoksia monissa suunnitteluprosessin käytännöissä. Seuraavaksi käsitellään sitä, miten voidaan varmistaa, että rakennushankkeessa otetaan huomioon ne asiat, joita elinkaarisuunnittelu vaatii.

Elinkaarisuunnittelun edellytyksenä on, että rakennuksen elinkaaren tavoitteet määritellään jo viimeistään hankesuunnitteluvaiheessa. Nämä tavoitteet tulee myös saattaa kaikkien hankkeen osapuolten tietoon. Elinkaaritavoitteita voivat olla mm. elinkaaren hiilijalanjälki, elinkaarikustannukset (LCC eli Life Cycle Cost) ja tavoitteet rakennuksen käyttäjille. Elinkaaritavoitteiden lisäksi tulee asettaa rakennuksen käyttötarkoituksen mukaiset tavoitteet rakennuksen sisällä vallitseville olosuhteille. Tässä voidaan käyttää apuna mm. sisäilmastoluokitusta (kts. kohta 4.2.2). Elinkaaritavoitteet ja rakennuksen sisäisten olosuhteiden tavoitteet asettavat yhdessä vallitsevien rakennusmääräysten

kanssa raja-arvoja käytettävillä teknisillä ratkaisuilla. Rakennuksen käyttöajan aikaisiin muutoksiin tulee myös varautua jo hankesuunnitteluvaiheessa (muuntojoustavuus). Tämä voi tarkoittaa esimerkiksi lämmitysjärjestelmän suunnittelemista niin, että lämmitykseen voidaan käyttää aurinkolämpöä tulevaisuudessa, kun aurinkokeräinten investointikustannukset laskevat ja tekniikka kehittyy tai varautumista rakennuksen käyttötarkoituksen muuttamiseen tulevaisuudessa. (Suomen talotekniikan kehityskeskus 2001)

Elinkaarisuunnittelussa rakennushankkeen eri osapuolien välinen yhteistyö korostuu. Yhteistyötä vaaditaan ensinnäkin suunnittelu- ja rakennusvaiheissa tilaajan, rakennuttajan (jos tilaaja ja rakennuttaja eivät ole sama taho), suunnittelijoiden ja urakoitsijoiden välillä. On tärkeää, että kaikki osapuolet pääsevät käyttämään omaa ammattitaitoaan mahdollisimman monessa rakennukseen liittyvässä päätöksessä. Tilaajan tulee ilmaista selkeästi oma tahtonsa siitä millaiseksi rakennus rakennetaan. Suunnittelijat voivat ammattitaidollaan auttaa rakennuttajaa ja tilaajaa, jotta rakennukselle saadaan määriteltyä realistiset tavoitteet. Tilaaja tuntee oman liiketoimintansa parhaiten, joten on hänen tehtävänsä ilmaista tahtonsa hankkeen muille osapuolille selkeästi. Rakennuttajalla vuorostaan on eniten kokemusta rakennushankkeen vetämisestä yleisellä tasolla. Rakennuttajalle kuuluu pätevien suunnittelijoiden hankkiminen rakennushankkeeseen. Urakoitsija(t) taas tietävät yleensä eniten käytännön rakentamisesta, työmaan toiminnasta sekä laitehankinnoista. Sen vuoksi onkin toivottavaa, että urakoitsija(t) osallistuvat rakennushankkeeseen jo ennen toteutusvaihetta. Perinteisesti urakoitsija on tullut hankkeeseen mukaan vasta urakkalaskentavaiheessa, jossa rakennuksen suunnittelu on edennyt jo melko pitkälle. Tärkeää on myös sujuva yhteistyö suunnittelualojen välillä. Tässä korostuu pääsuunnittelijan rooli. Elinkaarisuunnittelu edellyttää, että hankkeen pääsuunnittelija osaa koordinoida kommunikaatiota eri suunnittelijoiden, rakennuttajan ja urakoitsijoiden välillä. (Suomen talotekniikan kehityskeskus 2001)

Tärkeässä asemassa elinkaarisuunnittelussa on elinkaarianalyysi (LCA eli Life Cycle Assessment). Rakennuksen kohdalla LCA tarkoittaa rakennuksen koko elinkaaren aikaisen ympäristövaikutusten arvioimista. Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen laskenta on siis myös eräänlainen LCA-analyysi. LCA on tärkeä elinkaarisuunnittelussa, sillä se tuottaa informaatiota päätöksenteon tueksi. Hyvin toteutetun LCA:n avulla voidaan päästä selville esimerkiksi siitä mitkä asiat vaikuttavat rakennuksen hiilijalanjälkeen eniten. Näin suunnittelijat ja urakoitsijat tietävät, mihin heidän kannattaa toiminnassaan keskittyä. LCA:han sisältyy aina lukuisia epävarmuustekijöitä, koska siinä joudutaan ennustamaan tulevaisuuden tapahtumia. Suunnittelijoiden on tärkeä tuntea nämä epävarmuustekijät. Lisäksi LCA:ssa ongelmaksi on muodostunut tiedon saaminen käytettyjen materiaalien ja tuotteiden toimitusketjun ympäristövaikutuksista. Ratkaisuksi tähän ongelmaan on perustettu useita tietokantoja erilaisten materiaalien ja tuotteiden ympäristövaikutuksista. Esimerkiksi kohdassa 6.1 esitelty VTT:n LIPASTO on tällainen. (Suomen talotekniikan kehityskeskus 2001)

Elinkaarisuunnitteluun liittyy tänä päivänä vielä useita haasteita. Epävarmuuksia liittyy mm. rakennuksen käyttöaikaan, sen käyttäjien toimintaan, tekniikan kehittymiseen, energian päästöjen ja kustannuksien kehittymiseen sekä viranomais säätelyyn. Kaikki nämä asiat asettavat haasteita elinkaarisuunnittelulle. Suunniteltaessa monimutkaista ja lukuisin tavoin ympäristönsä kanssa vuorovaikuttavaa kokonaisuutta, kuten rakennusta, tulee kiinnittää huomiota lukuisien eri asioiden optimointiin. Keskittyminen liian voimakkaasti esimerkiksi energiankulutukseen voi aiheuttaa ongelmia (esim. rakenteiden

kosteus- ja kestävyysongelmat). Toimiva elinkaarisuunnittelu edellyttää siksi moninaisten asioiden välisten interaktioiden tuntemista. Haasteita elinkaarisuunnittelulle asettavat myös rakentamiseen liittyvät perinteiset ja osittain vanhentuneet toimintatavat. Esimerkiksi yhteistyö suunnittelijoiden ja urakoitsijoiden välillä on perinteisesti alkanut vasta myöhäisessä vaiheessa. Tämä käytäntö ei ole paras mahdollinen elinkaarisuunnittelun kannalta. Ongelmia esiintyy myös sopimusteknisissä asioissa. Rakennushankkeen perinteiset sopimusmallit ovat osittain soveltumattomia elinkaarisuunnittelussa käytettäväksi. Sopimusmallit eivät esimerkiksi palveleva tietomallien käyttöä hankkeessa erityisen hyvin (Valli 2013). Rakennusprosessi vaatii siis jonkin verran uudistamista, jos halutaan että se kunnolla tukee elinkaarisuunnittelun käyttämistä rakennushankkeissa.

5 Suunnitteluratkaisujen määrittely

Rakennuksen energiankulutuksen vähentäminen merkittävästi ei yleensä onnistu vain yhdellä tai kahdella suunnitteluratkaisulla. Rakennuksen energiankäyttö ja ympäristöhokkuus koostuvat lukuisista eri asioista. Jos energiankäyttöä halutaan merkittävästi pienentää, tulee ottaa käyttöön useita eri asioihin vaikuttavia suunnitteluratkaisuja. Tässä luvussa esitellään niitä suunnitteluratkaisuja, joilla rakennuksen ostoenergiankulutusta voidaan vähentää.

5.1 Rakennerratkaisut

SRMK D3:ssa esitettyihin rakenteiden U-arvojen vertailuarvoihin (kts. kohta 4.2.1) päästään helposti tavanomaisillakin rakennerratkaisuilla. Rakenteiden energiatehokkuutta voidaan korottaa tästä tasosta jonkin verran kasvattamalla eristyspaksuutta. Eristyspaksuutta ei voida kuitenkaan kasvattaa loputtomiin. Vaihtoehdoksi jää uusien teknologioiden käyttäminen rakenteissa. Seuraavaksi käsitellään uusia energiatehokkaita lämpöeristeitä sekä faasimuutosmateriaaleja rakenteiden energiatehokkuuden parantajina.

5.1.1 Uudet lämpöeristeet

Tyhjiöeristyspaneelien toiminta perustuu tyhjiön luomiseen paneelien sisälle, niin että lämmön johtuminen paneelin läpi vähenee radikaalisti. Todellisuudessa täydellisen tyhjiön luominen ei kuitenkaan ole mahdollista, vaan kaasun paine tyhjiöeristyspaneelin sisällä pyritään laskemaan mahdollisimman alas. Tarkoitus on laskea kaasun paine materiaalin huokosissa niin alas, että molekyylien keskimääräinen vapaamatka on samaa luokkaa tai pidempi kuin keskimääräinen huokoskoko. Tällöin molekyylit törmäilevät lähinnä vain huokosten seiniin eivätkä toisiinsa. Törmäykset kaasun molekyylien ja huokosten seinien välillä ovat elastisia, eivätkä siirrä energiaa kuten molekyylien keskinäiset törmäykset. (Baetens et al. 2010)

Ym. syistä tyhjiöeristyspaneelissa käytettävältä materiaalilta vaaditaan erittäin pientä huokoskoko. Lisäksi materiaalilta vaaditaan avoin solurakenne, jotta kaasun poistaminen huokosista onnistuu. Materiaalin täytyy myös kestää ainakin yhden baarin paineero, jotta solurakenne ei luhistu, kun se tyhjennetään kaasusta valmistusprosessin aikana. Näiden vaatimusten lisäksi käytettävän materiaalin tulisi vielä läpäistä mahdollisimman vähän lämpösäteilyä. Lämpösäteilyn merkitys korostuu tyhjiöeristyspaneeleissa, kun lämmön johtuminen on vähäistä. Yleisin tyhjiöeristyspaneeleissa käytetty materiaali on höyrytetty piidioksidi (fumed silica). Sen huokoskoko on noin 300 nm. Jos huokosten sisällä olevan kaasun paine on alle 50 mbar, höyrytetyn piidioksidin lämmönjohtavuus on noin 0,003 W/mK (vrt. mineraalivillalla 0,03–0,05). Tällä arvolla laskettuna höyrytettyä piidioksidia tarvitsee siis vain 1,77 cm SRMK D3:ssa esiintyvän ulkoseinän vertailuarvon 0,17 W/m²K saavuttamiseksi (kts. kohta 4.2.1). Todellisuudessa eristettä voidaan tarvita kuitenkin enemmän tyhjiöeristyspaneelien reunalla tapahtuvan suuremman lämpövirran vuoksi. Toisaalta myös rakenteen muut osat aiheuttavat lämpövastusta. (Baetens et al. 2010)

Itse päämateriaalin lisäksi tyhjiöeristyspaneelilla on kuori, jonka tarkoitus on pitää yllä tyhjiötä paneelin sisällä. Kuori koostuu useakerroksisesta kalvosta, joka kattaa koko paneelin. Kuoren materiaali on yleensä metallifoliota tai polymeerejä. Näiden materiaalien lämmönjohtavuus on yleensä melko suuri, mikä johtaa korostuneisiin lämpövirtoihin paneelin reunoilla. (Baetens et al. 2010)

Tyhjiöeristyspaneeleja on käytetty mm. olemassa olevien rakennusten eristyksen parantamiseen silloin, kun rakenteen kokonaispaksuutta ei ole haluttu/voitu syystä tai toisesta kasvattaa. Lisäksi niitä on käytetty ikkunoiden ja ovien karmeissa esiintyvien kylmäsiltojen eristämiseen. Tyhjiöeristyspaneelien suurin etu on ehdottomasti sen ylivoimainen eristävyys tavanomaisiin eristeisiin verrattuna (jopa 10 kertaa pienempi lämmönjohtavuus kuin mineraalivillalla). Tämä antaa mahdollisuuden rakentaa kevyempiä ja ohuempia rakenteita, jolloin voidaan saavuttaa säästöjä, kun muita materiaaleja ei tarvitse käyttää niin paljon. Tyhjiöeristyspaneelit ovat myös hyviä paloneristysominaisuuksiltaan. Niiden käyttöön liittyy kuitenkin muutamia ongelmia, jotka rajoittavat niiden käyttöä rakentamisessa. Tyhjiöeristyspaneelit ovat herkkiä. Ne puhkeavat helposti, jolloin sisällä oleva tyhjiö menetetään. Siksi niitä tulee käsitellä varovaisesti ja ne tulee tarvittaessa suojata. Ongelmana on myös joustamattomuus, sillä niitä ei voi ym. syistä rakennustyömaalla muotoilla leikkaamalla. Tyhjiöeristyspaneelien hinnat ovat vielä melko korkeita, mutta tämä voi muuttua, kun niiden valmistusmäärät lisääntyvät. Viimeiseksi ongelmia aiheuttaa paneelien sisällä olevan tyhjiön heikkeneminen ajan myötä. Tämä voi johtaa tarpeeseen korvata paneelit uusilla määräjain. (Baetens et al. 2010)

Aerogeeli on geeliä, jossa nestemäinen komponentti on korvattu kaasulla. Suosituin aerogeelimateriaali on silikaattivahto. Valmistuksen ensimmäinen vaihe on samanlainen kuin muidenkin geelien valmistamisessa. Toinen vaihe on faasidiagrammin ylikriittisissä olosuhteissa tehtävä materiaalin kuivaus. Tavanomainen haihduttaminen aiheuttaisi materiaalin huokosrakenteen luhistumisen höyrystyvän nesteen pintajännityksen vuoksi. Silikaattivahto on erittäin huokoista, 85–99,8 % sen tilavuudesta on ilmaa. Huokoskoko on myös erittäin pieni, vain 5–70 nm. Tämän vuoksi silikaattivaahdon lämmönjohtavuus on hyvin matala, vaikka kaasun paine huokosissa olisi sama kuin ympäristön paine. Kaupallisten silikaattivahtojen lämmönjohtavuus on 0,0131–0,0136 W/mK. Silikaattivahtoa tarvitaan siis noin 7,9 cm SRMK D3:n vertailuarvon saavuttamiseksi. (Baetens et al. 2011)

Aerogeeliä on käytetty mm. suurien lasipintojen eristämiseen sen läpinäkyvyyden vuoksi. Lisäksi sitä on käytetty joidenkin vanhojen rakennusten energiatehokkuuden parantamiseen. Aerogeelin vahvuus on hyvä eristävyys (noin 2–3 kertaa parempi kuin tavallisella mineraalivillalla). Käyttö on kuitenkin ollut toistaiseksi melko pientä johtuen etenkin aerogeelin korkeasta hinnasta, joka on seurausta monimutkaisesta valmistusprosessista. Jotta aerogeeli voisi kilpailla tavanomaisten rakennuseristeiden kanssa, sen valmistusprosessia tulisi kehittää huomattavasti halvemmaksi. Tästä puutteesta huolimatta monet alan tutkijat pitävät aerogeeliä lupaavana tulevaisuuden eristysvaihtoehtona. (Baetens et al. 2011)

5.1.2 Faasimuutosmateriaalit

Rakentamisessa on jo pitkään hyödynnetty lämmön varastoitumista rakenteisiin. Rakenteet pystyvät varastoimaan sitä enemmän lämpöä, mitä suurempi niiden lämpökapasiteetti on. Rakenteen lämpökapasiteettia on voitu kasvattaa lisäämällä rakenteen massaa tai käyttämällä materiaaleja, joilla on suuri ominaislämpökapasiteetti. Faasimuutosmateriaalien myötä käytössä on nyt myös kolmas tapa rakenteiden lämmönvarastoimiskyvyn kasvattamiseksi. Faasimuutosmateriaalit ovat rakenteessa olevia materiaaleja, jotka muuttavat olomuotoaan nestemäisestä kiinteäksi tai höyryksi tietyssä lämpötilassa. Näin rakenne pystyy siis varastoimaan tuntevan lämmön lisäksi myös latenttia lämpöä. Siksi

faasimuutosmateriaalit voivat lisätä merkittävästi rakenteen lämmönvarastoimiskykyä (termistä massaa) lisäämättä rakenteen massaa ylenpalttisesti. Suurempi terminen massa rakenteessa tarkoittaa pienempiä lämpötilavaihteluita rakennuksen sisällä sekä pienempiä tehohuippuja lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmille. Usein saavutetaan myös säästöjä lämmitys- ja jäähdytysenergian kokonaiskulutuksissa, kun ilmaisenergia pystytään hyödyntämään tehokkaammin. (Parameshwaran et al. 2012)

Faasimuutosmateriaalilta vaaditaan tietyntylaisia ominaisuuksia. Ideaalisella faasimuutosmateriaalilla on korkea tiheys ja sulamislämpö sekä korkea lämmönjohtavuus. Korkea tiheys ja sulamislämpö aiheuttavat sen, että materiaali pystyy varastoimaan tilavuusyksikköä kohden paljon energiaa (energiatiheys). Korkea lämmönjohtavuus taas helpottaa ja nopeuttaa faasimuutoksen tapahtumista materiaalissa. Muita positiivisia ominaisuuksia faasimuutosmateriaalilla ovat syttymättömyys, pieni tilavuusero faasien välillä ja se, että materiaali ei aiheuta korroosiot. Faasimuutosmateriaaleiksi on tarjolla sekä epäorgaanisia että orgaanisia vaihtoehtoja. Epäorgaanisista materiaaleista mm. hydraattisuoloja on käytetty tähän tarkoitukseen. Hydraattisuolojen etuja ovat korkea energiatiheys ja lämmönjohtavuus, halpa hinta ja syttymättömyys. Haittapuolia taas ovat mm. korroosio ja epäsopevuus joidenkin rakennusmateriaalien kanssa. Orgaaniset faasimuutosmateriaalit taas soveltuvat käytettäväksi useampien rakennusmateriaalien kanssa, mutta niiden ongelmia ovat mm. suuret tilavuusmuutokset, syttyvyys ja matala lämmönjohtavuus. Orgaanisia ja epäorgaanisia materiaaleja voidaan myös sekoittaa esimerkiksi halutun sulamislämpötilan aikaansaamiseksi. Sulamislämpötilan tulisi olla lähellä mitoitettua sisälämpötilaa, yleensä 18–23 °C. (Tyagi et al. 2011)

Faasimuutosmateriaaleja voidaan käyttää rakennuksissa monin eri tavoin. Ne voidaan integroida suoraan rakenteisiin sekoittamalla faasimuutosmateriaalit esimerkiksi betoniin, kipsiin, laastiin tai lämpöeristeisiin. Faasimuutosmateriaaleja voidaan sekoittaa niin alapohjan, seinien kuin yläpohjankin rakennusmateriaaleihin. Toinen vaihtoehto on käyttää jälkikäteen asennettavia faasimuutosmateriaalia sisältäviä levyjä. Faasimuutosjärjestelmät voivat olla joko passiivisia tai aktiivisia. Passiivisissa järjestelmissä materiaali varastoi rakennuksen tai auringon lämpöä ilman faasimuutosmateriaalien erillistä lämmitystä tai jäähdytystä. Aktiivisissa järjestelmissä lämmön varastoitumista voidaan tehostaa esim. puhaltimilla sekä lämmittämällä tai jäähdyttämällä faasimuutosmateriaaleja sähkövastuksin silloin, kun sähkö on halvempaa. Faasimuutosmateriaalien käyttö vaatii huolellista suunnittelua. Rakennuksen lämpökuorma- ja lämpöhäviöprofiilien tulee olla tiedossa, jotta järjestelmä voidaan mitoittaa oikein. Materiaalien käyttö vaatii osaamista rakennesuunnittelijalta sekä toimivaa yhteistyötä ainakin rakenne-, LVI- ja arkkitehtisuunnittelijoiden välillä. (Parameshwaran et al. 2012)

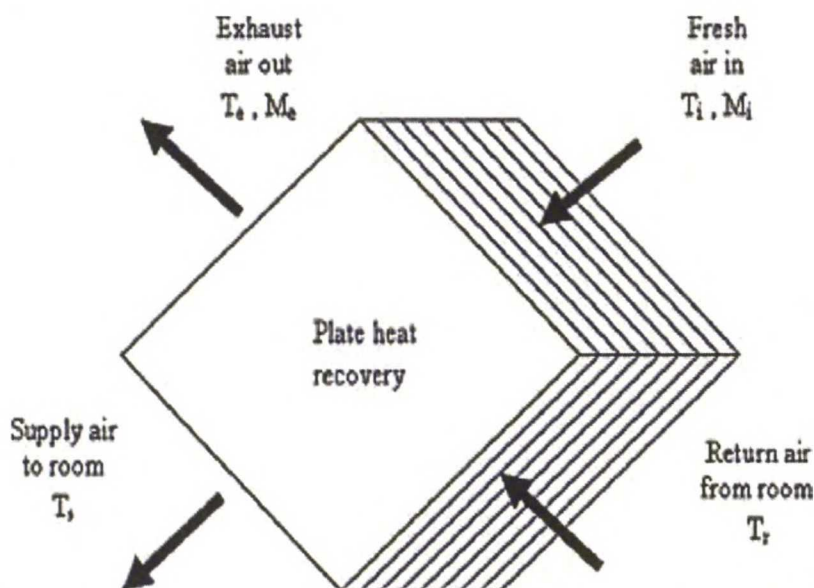
Moni asia puoltaa faasimuutosmateriaalien käyttöä. Rakennuksen lämpökapasiteetin lisääntyessä lämpötilavaihtelut pienenevät, mikä lisää rakennuksen käyttäjien mukavuutta ja helpottaa lämpötilanhallintaa. Aiheesta tehdyt lukuisat tutkimukset lisäksi tukevat oletusta, että faasimuutosmateriaalien käytöllä voidaan saavuttaa säästöjä sekä lämmitys- että jäähdytysenergian kulutuksessa. Tutkimuksissa tilojen lämmitys- ja jäähdytysenergian säästöt ovat olleet passiivisilla faasimuutosjärjestelmillä luokkaa 10–15 %. Aktiivisilla jäähdytyssovellutuksilla on tutkimuksissa saavutettu jopa 45–55 % säästöt jäähdytysenergian kulutuksessa. Rahallisia säästöjä lisää mahdollisuus jäähdyttää tai lämmittää faasimuutosmateriaaleja yöllä, kun sähkö on vähäisen kulutuksen vuoksi halvempaa. Faasimuutosmateriaalit siis tehostavat jo nyt toimistorakennuksissa

yleisesti käytettävän yötuuletuksen vaikutuksia. Kustannussäästöjä syntyy lisäksi siitä, että rakenteiden korkeamman lämmönvarastoimiskyvyn vuoksi lämmityksen ja jäähdytyksen tehohuiput jäävät pienemmiksi, jolloin lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät voidaan mitoittaa pienemmiksi. Faasimuutosmateriaaleja voidaan käyttää myös aurinkoenergian passiivisessa hyödyntämisessä. Tällöin materiaalit voidaan sijoittaa esimerkiksi etelään päin olevan ikkunan eteen lattiaan, jolloin lattia absorboi siihen osuvan auringonvalon tehokkaasti. Haasteita faasimuutosmateriaalien käytössä liittyy mm. niiden kustannuksiin ja käyttäytymiseen rakennusmateriaaleihin sekoitettuna. Suurimmat haasteet kuitenkin liittyvät suunnittelijoiden tietotaidon puutteeseen aiheesta. Faasimuutosmateriaalien käytöstä ei vielä ole paljon käytännön kokemuksia laboratorioiden ulkopuolella. Etenkin niiden termodynaaminen käyttäytyminen erilaissa ilmastoissa vaatii lisätutkimusta. (Parameshwaran et al. 2012)

5.2 Ilmanvaihto

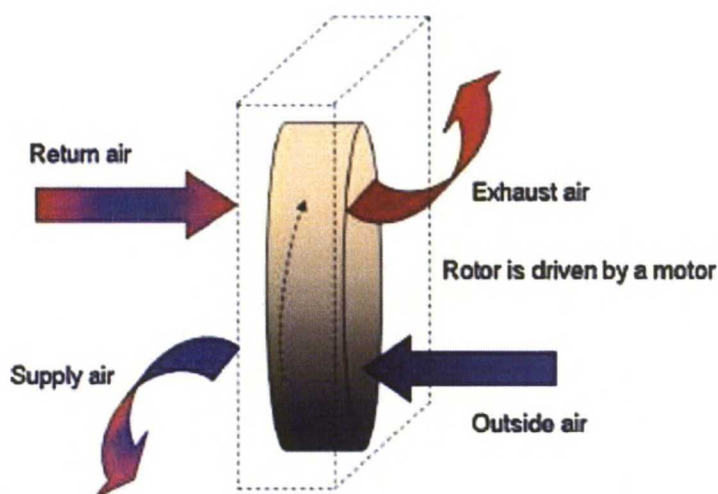
5.2.1 Lämmöntalteenotto

Yleisimmin käytetty LTO:n tyyppi on levylämmönsiirrin (suora rekuperatiivinen), jota käytetään paljon etenkin pientaloissa. Levylämmönsiirtimessä siirtopinnat rakentuvat ohuista yhteen pinotuista metallilevyistä. Lämpö siirtyy poistoilmasta tuloilmaan metallilevyjen läpi. Levylämmönsiirtimet voivat olla joko ristivirta-, vastavirta tai myötävirtalämmönsiirtimiä. Levylämmönsiirtimet eivät yleensä siirrä kosteutta eivätkä siten myöskään latenttia lämpöä, jolla tarkoitetaan ilmassa olevaan vesihöyryyn sitoutunutta lämpöä. Tyypillinen lämpötilahyötysuhde η_t levylämmönsiirtimillä on 50–80 %. Korkeisiin hyötysuhteisiin päästään helpoiten vastavirtatyypisillä siirtimillä. Levylämmönsiirtimien jäätyminenesto ja tehonsäätö tapahtuu ohituspellillä tai lohkoittaisella lämmityksellä. Levylämmönsiirtimiä voidaan käyttää vain silloin, kun tulo- ja poistoilmakoneet ovat sijoitettu samaan huoneeseen. Levylämmönsiirtimien suuri tilantarve voi myös aiheuttaa joissain kohteissa ongelmia. (Mardiana-Idayu & Riffat 2012) (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2012)



Kuva 11 Ristivirtalevylämmönsiirtimen toimintaperiaate (Mardiana-Idayu & Riffat 2012)

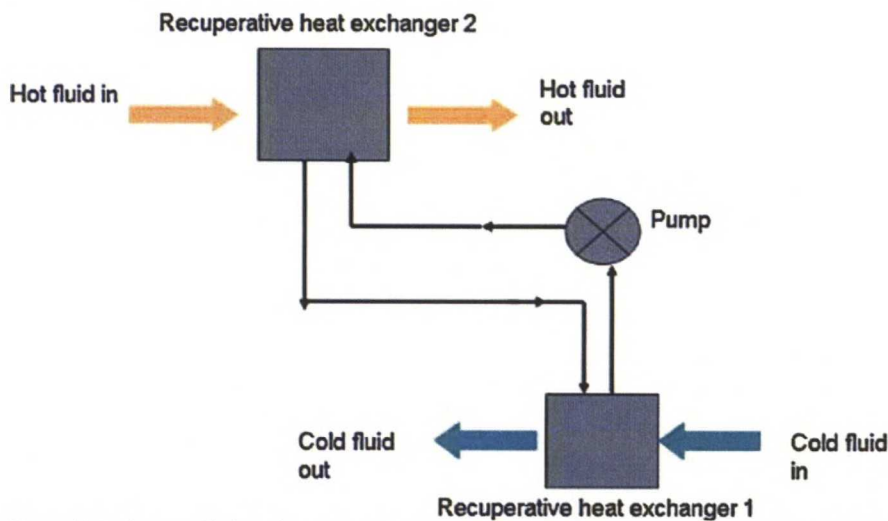
Toimisto- ja liikerakennuksissa käytetyin LTO:n tyyppi on regeneratiivinen lämmönsiirrin. Yleisin regeneratiivinen (lämpöä varaava) lämmönsiirrin on pyörivä kiekko, jonka molemmat puolet ovat vuorotellen kosketuksissa tulo- ja poistoilmavirtaan (kts. Kuva 12). Kiekkoa pyöritetään sen omalla moottorilla. Regeneratiivinen lämmönsiirrin pystyy siirtämään myös kosteutta ja latenttia lämpöä poistoilmasta tuloilmaan. Tämä on etenkin talvella toivottava ominaisuus. Pyörivän LTO:n lämpötilahyötysuhde on yleisimmistä LTO-tyypeistä korkein, yleensä 60–80 %. Yli 80 %:n lämpötilahyötysuhteetkaan eivät ole tavattomia. Regeneratiivisen lämmönsiirtimen pyörimisnopeus on tyypillisesti 3–15 kierrosta minuutissa. Jäätymisenestoa ja siirtimen tehoa voidaan ohjata säätämällä pyörimisnopeutta. Myös pyörivää lämmönsiirrintä voidaan käyttää vain silloin, kun tulo- ja poistoilmakoneet ovat samassa tilassa. Pyörivää lämmönsiirrintä ei voida käyttää tapauksissa, joissa poistoilmassa on paljon epäpuhtauksia, kuten rasvaa tai bakteereja, sillä epäpuhtaudet tukkivat lämmönsiirtimen helposti. Pyörivä lämmönsiirrin siirtää aina jonkin verran epäpuhtauksia poistoilmasta tuloilmaan. Siksi sitä ei myöskään voida käyttää tiloissa, joissa vaaditaan erityistä puhtautta (esim. leikkaussalit). Epäpuhtauksien siirtyminen on kuitenkin niin vähäistä, että toimisto-, liike- ja asuinrakennuksissa pyörivän LTO:n siirtämät epäpuhtaudet eivät vaikuta merkittävästi sisäilman laatuun. (Mardiana-Idayu & Riffat 2012) (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2012)



Kuva 12 Regeneratiivinen lämmönsiirrin (Mardiana-Idayu & Riffat 2012)

Epäsuoria rekuperatiivisia lämmönsiirtimiä käytetään niissä paikoissa, joissa poistoilma on erittäin likaista ja paikoissa, joissa tuloilmalta vaaditaan erityistä puhtautta. (Epäsuora) Rekuperatiivinen lämmönsiirrin on ainoa LTO-tyyppi, jota voidaan käyttää vaikka tulo- ja poistoilmakoneet sijaitsevat eri tiloissa. Tämän vuoksi niitä käytetään etenkin peruskorjaushankkeissa, mikäli tila konehuoneissa on kortilla. Rekuperatiivisessa LTO:ssa tulo- ja poistoilmavirrat eivät ole millään lailla kosketuksissa, vaan lämpö siirretään virtaavan väliaineen avulla. Tämän vuoksi ne soveltuvat erityistä puhtautta vaativiin tiloihin. Järjestelmään kuuluu siis kaksi rekuperatiivista lämmönsiirrintä ja väliainetta putkistossa kierrättävä pumppu (kts. Kuva 13). Tavallisissa tapauksissa lämmönsiirtimet ovat yleensä lamellipattereita, jotka koostuvat useista yhdensuuntaisista levyistä, joiden välissä ilma virtaa. Kohteisiin, joissa ilma on erityisen likaista (esim. ammattikeittiöt) lamellipatterit eivät usein sovellu, sillä niitä on hankala puhdistaa (ohuet lamellilevyt painuvat helposti kokoon, kun niitä suihkutetaan painepesurilla). Näissä kohteissa käytetään neulaputkipattereita niiden hyvän puhdistettavuuden vuoksi. Neula-

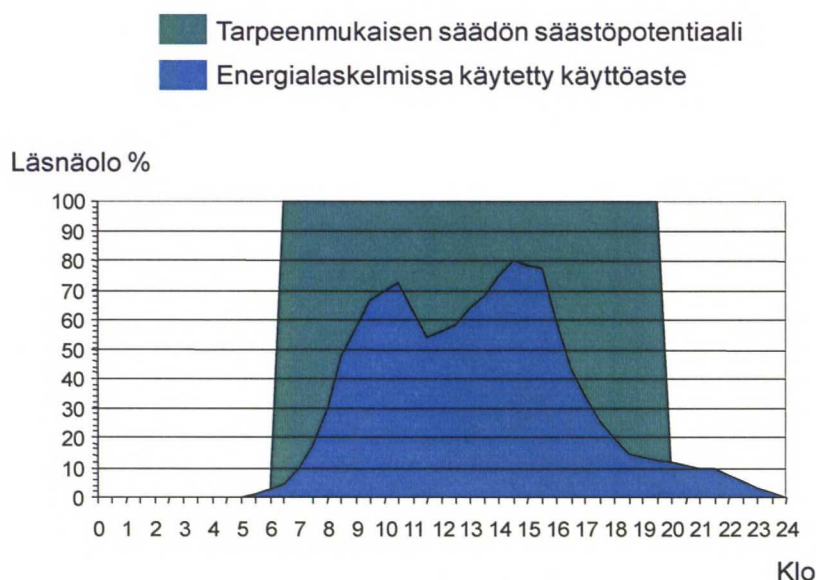
putkipatteri koostuu putkista, jotka on varustettu neuloilla lämmönsiirtopinta-alan lisäämiseksi, joiden välissä ilma virtaa. Rekuperatiivisissa lämmönsiirtimissä lämmönsiirron väliaineena käytetään yleensä vesi-glykoliliuosta. Glykolia lisätään veteen jäätymisen estämiseksi, vaikka se heikentääkin hieman nesteen lämmönsiirtoominaisuuksia. Rekuperatiivisella lämmöntalteenotolla ei voida luonnollisesti siirtää latenttia lämpöä. Lämpötilahyötysuhde rekuperatiivisella LTO:lla on tyypillisesti vain noin 45–65 %, minkä vuoksi sitä ei tule käyttää, jos sen käytölle ei ole erityistä syytä. Nestepuolen painehäviöt rekuperatiivisissa lämmönsiirtimissä ovat usein melko suuret, minkä vuoksi nestekiertoisen järjestelmän pumput kuluttavat merkittävästi sähköenergiaa. Pumppujen energiankulutusta voidaan pienentää mm. oikealla mitoituksella ja pumppujen tarpeenmukaisella käytöllä (esim. taajuusmuuttajasäätö). (Mardiana-Idayu & Riffat 2012) (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2012)



Kuva 13 Rekuperatiivisen lämmöntalteenoton toimintaperiaate (Mardiana-Idayu & Riffat 2012)

5.2.2 Tarpeenmukainen ilmanvaihto

Ilmanvaihdon tarpeenmukaisella ohjauksella voidaan saavuttaa säästöjä sekä sähköenergian että lämmitysenergian kulutuksessa, kun tilojen vuosittaisia kokonaisilmamääriä saadaan pienennettyä. Esimerkiksi toimistotilojen käyttöaste edes työaikana on harvoin 100 % (kts. kuva 14).



Kuva 14 Ilmanvaihdon tarpeenmukaisen säädön säästöpotentiaali (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2012)

Tarpeenmukaisen ohjauksen toteuttamiseksi vaaditaan tilakohtaiset ilmamäärän ohjausyksiköt (ellei säädetä tuloilman lämpötilaa). Tarpeenmukainen ohjaus voi perustua liiketunnistimiin, CO₂-pitoisuuteen, jonkun muun epäpuhtauden pitoisuuteen tai lämpötilaan. Läsnäolon havaitsemiseen käytetään liiketunnistimia. Liiketunnistimista ei yleensä pystytä päättelemään tilassa olevien henkilöiden lukumäärää, mistä johtuen ohjaus on kaksiportaista. Tällä tarkoitetaan sitä, että ilmanvaihto käy joko täydellä teholla (kun tilassa havaitaan liikettä) tai ennalta määritellyllä vajaateholla (kun liikettä ei havaita). CO₂-pitoisuutta voidaan mitata CO₂-antureilla. CO₂-pitoisuuteen perustuva ilmamäärän ohjaus voidaan toteuttaa myös portaattomana. Ilmanvaihdon mitoittaminen pelkän CO₂-pitoisuuden perusteella johtaa kuitenkin ilman laadun kannalta liian pieniin ilmamääriin. CO₂-pitoisuutta voidaan kuitenkin käyttää tilassa olevien henkilöiden lukumäärän dynaamiseen arviointiin, jolloin tilan ilmamäärä saadaan kertomalla yhtä henkilöä kohti vaadittava ilmamäärä tilassa olevien henkilöiden lukumäärällä. CO₂-pitoisuuteen perustuvalla dynaamisella henkilömääräarvioinnilla päästään hyvin lähelle tilojen todellisia henkilömääriä. Tällä tavoin voidaan säästää ilmanvaihdon energiankulutuksesta yli 15 % (Yang et al. 2011).

Lämpötilaohjattu ilmamäärän ohjaus soveltuu etenkin niihin tiloihin, joissa jäähdytykseen (tai lämmitykseen) käytetään tuloilmaa. Suuret tilat, joissa henkilökuormitus vaihtelee päivän mittaan merkittävästi, kuten neuvotteluhuoneet ja auditoriot, ovat yleensä tällaisia tiloja. Esimerkiksi kesällä ilmamäärät säädetään lämpötilaohjauksen perusteella niin, että huoneen lämpötila ei nouse asetusarvoa korkeammalle (tuloilman lämpötila pidetään vakiona). Jäähdytystilanteessa pienellä tuloilman lämpötilan asetusarvolla säästetään puhaltimien sähkönkulutuksessa, sillä vaaditut ilmamäärät ovat tällöin pienempiä. Tällöin ongelmaksi voi kuitenkin muodostua mm. tuloilman jäähdytyspatterien tehon riittävyys tai veto. Optimaalinen tuloilman lämpötila riippuu mm. jäähdytyskuormista, ulkoilman lämpötilasta, puhaltimien hyötysuhteista ja energian hinnasta (Wang & Song 2012). Huonelämpötilan hallinta voidaan toteuttaa myös säätämällä tuloilman lämpötilaa mitatun huoneilman lämpötilan mukaan. Sekä ilmamääräsäätöisessä että

lämpötilasääteisessä järjestelmässä tulee huolehtia, että huoneeseen ei synny liiallista vetoa. Vedon syntymistä voidaan ehkäistä mm. käyttämällä matalanopeuksisia ja tehokkaasti sekoittavia tuloilmalaitteita. (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry 2012)

5.3 Veden kulutuksen pienentäminen

Vedenkulutuksen vähentäminen pienentää rakennuksen hiilijalanjälkeä kahdella eri tavalla. Ensinnäkin se vähentää puhtaan veden tuottamisesta aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä ja toiseksi lämpimän veden kulutuksen pienentyminen vähentää lämmitysenergian tarvetta. Vedenkulutusta voidaan vähentää käyttämällä vettä säästäviä vesikalusteita tai vaikuttamalla rakennuksen käyttäjien kulutustottumuksiin.

Vedenkulutusta voidaan pienentää korvaamalla vanhat vesikalusteet uusilla vähemmän vettä kuluttavilla malleilla. Etenkin suihkut, vesihanat ja wc-istuimet korvaamalla voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä. Korvaamalla vanhat suihkupäät uusilla on käyttökokeissa saavutettu 35–45 %:n säästöjä vedenkulutuksessa. Vesihanoissa voidaan säästää 10–25 % korvaamalla vanhanmalliset kaksioitehanat yksioitehanoilla. Vanhat WC-istuimet voivat kuluttaa vettä jopa 12 litraa/huuhtelu, kun uusimmissa kaksoisnupillisissa malleissa kulutus on 4/2 litraa/huuhtelu. Myös vanhojen vesikalusteiden vedenkulutusta voidaan pienentää asentamalla niihin kuristimena toimivat virtauksenrajoittimet. Virtauksenrajoittimet vähentävät vedenkulusta 10–30 %. Vedenkulutusta voidaan pienentää myös säätämällä käyttöveden verkoston painetasoa vakioapaineventtiilillä. (Ympäristöministeriö 2009a)

LVI-suunnittelija voi vaikuttaa rakennuksen käyttäjien kulutustottumuksiin suunnitelmalla rakennukseen tilakohtaiset vesimittarit. Mikäli tilan käyttäjä joutuu maksamaan itse jokaisesta käyttämästään vesikuutiosta, vettä käytetään yleensä säästeliäämmin. Kiinteä vesimaksu ei välttämättä ole optimaalinen keino tilojen vedenkulutuksen kannalta. Ympäristöministeriön työryhmämuistion (2009) mukaan huoneistokohtaiseen mittaukseen perustuvalla laskutuksella saadaan asuinrakennuksen vedenkulutusta pienennettyä noin 10 %. Toimistorakennuksissa toimitilakohtaisella vedenmittauksella tuskin kuitenkaan päästäisiin yhtä vaikuttaviin säästölukemiin. Tämä johtuu siitä, että vedenkulutus toimistorakennuksissa on jo nykyisellään melko matalalla tasolla.

5.4 Valaisinratkaisut

Valaistuksen sähkönkulutusta voidaan vähentää käyttämällä tehokasta valaisin- ja lampputeknologiaa, luonnonvaloa hyödyntävällä arkkitehtonisella suunnittelulla, huolellisella ylläpidolla sekä tietenkin energiatietoisella valaistuksen suunnittelulla. Seuraavaksi käsitellään ratkaisuja valaistuksen sähkönkulutuksen vähentämiseen.

Suunnittelijan kannalta yksinkertaisin tapa vähentää valaistuksen sähkönkulutusta on käyttää uutta ja energiatehokasta teknologiaa. Monissa kohteissa on edelleenkin käytössä vanhat T8- tai vielä vanhemmat T12-typin loisteputkilamput, joiden valotehokkuus on huomattavasti uusia T5-typin loisteputkilamppuja heikompi. T5-typin loisteputkilampuilla valotehokkuus on noin 90–104 lm/W, kun T12-typin lampuilla, jotka käyttävät vielä vanhoja magneettisia kuristimia vastaava luku on 60 lm/W. Vaihtamalla T12-typin loisteputkilamppu T5-tyyppiseen voidaan siis saavuttaa jopa 40 %:n säästö kyseisen valaisimen sähkönkulutuksessa. Toinen vaihtoehto on LED-lamput, joiden määrä kasvaa kokoajan LED-teknologian parantuessa ja lamppujen hintojen laskiessa.

Arvioidaan, että LED-lamput muodostavat enemmistön käytetyistä lampuista vuoteen 2035 mennessä. LED-lamppujen valotehokkuus on kasvanut erittäin nopeasti. Vuonna 2009 oli jo saatavilla LED-lamppuja, joiden valotehokkuus oli 100 lm/W. LED-lamppujen yleistymistä jarruttaa kuitenkin vielä toistaiseksi niiden korkeampi hinta (LED-lampuilla 30 \$/kilo-lm, T8-loisteputkilampuilla 4 \$/kilo-lm) (Aman et al. 2013). (Dubois & Blomsterberg 2011)

Yksi keino vähentää valaistuksen sähkönkulutusta on erottaa ympäristön valaistus ja paikallinen työpistevalaistus toisistaan. Näin on mahdollista käyttää suuriakin valaistusvoimakkuuksia siellä missä niitä tarvitaan kuitenkin pitämällä keskimääräiset valaistusvoimakkuudet alhaisempina. Työpisteiden valaistusvoimakkuus voi olla esim. 500 lx ympäristön valaistusvoimakkuuden ollessa vain 100 lx. Työpisteiden ympäristössä vaadittavat valaistusvoimakkuudet voidaan saavuttaa joissain tapauksissa jopa pelkällä päivänvalolla. Tanskassa tehdyssä tutkimuksessa jossa hyödynnettiin päivänvaloa työpisteiden ympäristön valaisemisessa, saatiin asennettujen valaisimien yhteenlasketuksi tehoksi vain 5,4 W/m² (keskimäärin toimitiloissa noin 10,5 W/m²). Tällä tavoin saavutettiin 25 %:n vähennys sähkönkulutuksessa, niin että paikalliset rakennusmääräykset kuitenkin täyttyivät (500 lx työpisteellä, 200 lx välittömässä ympäristössä, 100 lx kauempana ympäristössä ja 50 lx muualla). Työntekijät ovat myös yleensä tyytyväisempiä, jos he voivat säädellä työpisteensä valaistusta yksilöllisesti. Jotkut tutkijat suhtautuvat kohdevalaistukseen kuitenkin varauksella, sillä se voi aiheuttaa silmien väsymistä etenkin pitkiä aikoja yhteen menoon työskenneltäessä. Tämän vuoksi työpistevalaistusta ei tulisi koskaan käyttää ainoana valonlähteenä. Jotkut työntekijät voivat myös kokea ympäristön valaistuksen riittämättömäksi. Lisäksi paikallisen työpistevalaistuksen järjestäminen vaatii erilliset valaisimet jokaiselle työntekijälle, mikä nostaa investointikustannuksia ja vaatii käytön aikana usein lisäjärjestelyjä, jotta jokaisella työntekijällä on saatavilla omat työpistevalaisimet. (Dubois & Blomsterberg 2011)

Huoneen valaistusvoimakkuus pienenee ajan kuluessa. Tähän vaikuttaa mm. valaisimien tyyppi, lamppujen ja valaisimien huolto ja puhdistaminen sekä lian kertyminen valaisimiin ja huoneen valoa heijastaviin pintoihin. Toimistoissa valaisimien valotehokkuus voi tyypillisesti vähentyä korkeintaan 5 % vuodessa. Valaistuksen sähkönkulutusta voidaan siis vähentää huoltamalla lamput säännöllisesti ja pitämällä rakennuksen pinnat puhtaana. Hyvä huoltotoiminta edellyttää, että valaisimet puhdistetaan vuosittain, muut pinnat kolmen vuoden välein, ja että lamput vaihdetaan tarpeeksi usein. Lamppujen vaihtoväli riippuu käytettyjen lamppujen tyypistä. (Dubois & Blomsterberg 2011)

Valaistuksen sähkönkulutusta voidaan pienentää myös vähentämällä valaisimen käyttöaikaa ja käyttämällä himmentimiä. Käyttöaikaa voidaan pyrkiä vähentämään esimerkiksi läsnäolosensoreilla. Sammuttamalla valot automaattisesti läsnäolosensorien avulla voidaan saavuttaa 20–35 % säästöt sähkönkulutuksessa. Käyttämällä manuaalisia himmentimiä säästöt vaihtelevat välillä 7–25 %. (Dubois & Blomsterberg 2011)

Auringonvaloa hyväksi käyttämällä voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä valaistuksen sähkönkulutuksessa. Käyttämällä automaattisia kytkimiä ja himmentimiä auringonvalosensorien kanssa, voidaan saavuttaa noin 30–60 %:n säästöt valaistuksen sähkönkulutuksessa. Säästöpotentiaalin suuruuteen vaikuttavat mm. ikkunoiden ala ja ominaisuudet, valon- ja häikäisysojausrakenteiden käyttö sekä lattian ja seinien heijastavuus. Valaistuksen säästöjen suuruuteen vaikuttaa ikkunoiden valonläpäisy eli transmittanssi.

Myös ikkunoiden korkeudella on merkitystä. Mitä korkeammalla ikkuna sijaitsee, sitä paremmin huoneen alaosa on valaistu ja sitä syvemmälle huoneeseen päivänvalolla valaistu alue ulottuu. Näiden ominaisuuksien lisäksi ikkunoiden kokonaisalalla on myös merkittävä vaikutus säästöpotentiaaliin. Suurilla ikkuna-aloilla saadaan huoneeseen enemmän päivänvaloa, mutta samalla myös rakennuksen lämmitys- ja jäähdytyskustannukset kasvavat. Isot ikkuna-alat myös lisäävät häikäisevän valon määrää rakennuksessa, mikä voi johtaa kohonneeseen valon- ja häikäisy-suojaurakenteiden käyttöön, jolloin myös valaistuksen sähkönkulutuksen säästöt jäävät pienemmiksi. Nostamalla ikkunoiden alan suhde pohjapinta-alaan 16 %:sta 32 %:iin saavutetaan noin 36 %:n valaistuksen sähkönkulutuksessa (ikkunoiden näkyvän valon transmittanssi oli tässä tapauksessa 81 %). Vastaava säästö oli 12 %, kun ikkunan näkyvän valon transmittanssi oli vain 20 %. Näissä laskuissa ei kuitenkaan huomioitu lisääntynyttä lämmityksen ja jäähdytyksen tarvetta. (Dubois & Blomsterberg 2011)

Valon- ja häikäisy-suojaurakenteiden käyttö aiheuttaa epävarmuutta simuloinneissa ja laskuissa. Tämä johtuu siitä, että simuloinneissa ja laskuissa yleensä oletetaan kaihtimien olevan jatkuvasti auki. Ihmisten kaihdinkäyttäytymistä on kuitenkin hankala ennustaa. Ottawassa tehdyissä tutkimuksissa huomattiin, että päivänvalon mukaan säätyvä automaattista himmennystä käyttävissä järjestelmissä säästöt putosivat 5–45 %, kun mukaan otettiin ikkunoissa olevat manuaaliset kaihtimet. Saavutetut säästöt olivat suuremmat tapauksissa, joissa käytettiin automaattisesti päivänvalon mukaan säätyviä kaihtimia (Galasiu et al. 2004). Kaiken kaikkiaan auringonvaloa hyödyntämällä voidaan saavuttaa jopa erittäin merkittäviä säästöjä valaistuksen sähköenergian kulutuksessa. Säästöjen suuruutta on kuitenkin hankala simuloinnilla tarkasti selvittää lukuisten muutujien vuoksi. Asennuksien jälkeen tehdyt tutkimukset osoittavat, että auringonvaloa hyödyntävien valaistusjärjestelmien tehokkuus on usein ennustettua huonompi. (Dubois & Blomsterberg 2011)

5.5 Maalämmön ja -kylmän hyödyntäminen

Maalämmön ja -kylmän hyödyntäminen rakennuksessa vaatii useiden asioiden tarkkaa suunnittelua ja huomioimista. Tässä kohdassa käsitellään näistä asioista seuraavia: vaatimukset rakennukselle, lämpöpumpun ominaisuudet, järjestelmän mitoitus sekä maaperän vaikutus.

Maalämpöä voidaan teoriassa hyödyntää lähes kaikissa rakennuksissa. Käytännössä järjestelmän tulee kuitenkin olla taloudellisesti kannattava. Maalämpöjärjestelmä toimii sitä tehokkaammin, mitä matalampi sen lauhdutuslämpötila on. Tämän vuoksi on maalämpöjärjestelmän kannalta edullista, jos rakennuksen lämmitysjärjestelmä toimii matalalla lämpötilatasolla. Matalalla lämpötilatasolla toimivia lämmitysjärjestelmiä ovat mm. lattialämmitys ja säteilylämmittimet. SRMK D1:n mukaan lämmin käyttövesi on lämmitettävä 55 °C:een legionella-bakteerin lisääntymisen ehkäisemiseksi (Ympäristöministeriö 2007a). Rakennuksissa, joissa on maalämpöjärjestelmä, lämmin käyttövesi voi olla kannattavampaa tuottaa erillisillä sähkövastuksilla tai toisella lämpöpumpulla. Vähäinen lämpimän käyttöveden kulutus lisääkin maalämpöjärjestelmän kannattavuutta. Tämä seikka puoltaa maalämmityksen käyttöä toimistorakennuksissa. Maakylmän hyödyntämisen kannalta on edullista, jos rakennuksessa on korkealämpötilainen jäähdytysjärjestelmä, kuten säteilijäjäähdytys. Tällöin vapaajäähdytystä voidaan hyödyntää pidemmälle kesään kuin matalalämpötilaisella jäähdytysjärjestelmällä. (Stammeier 2010)

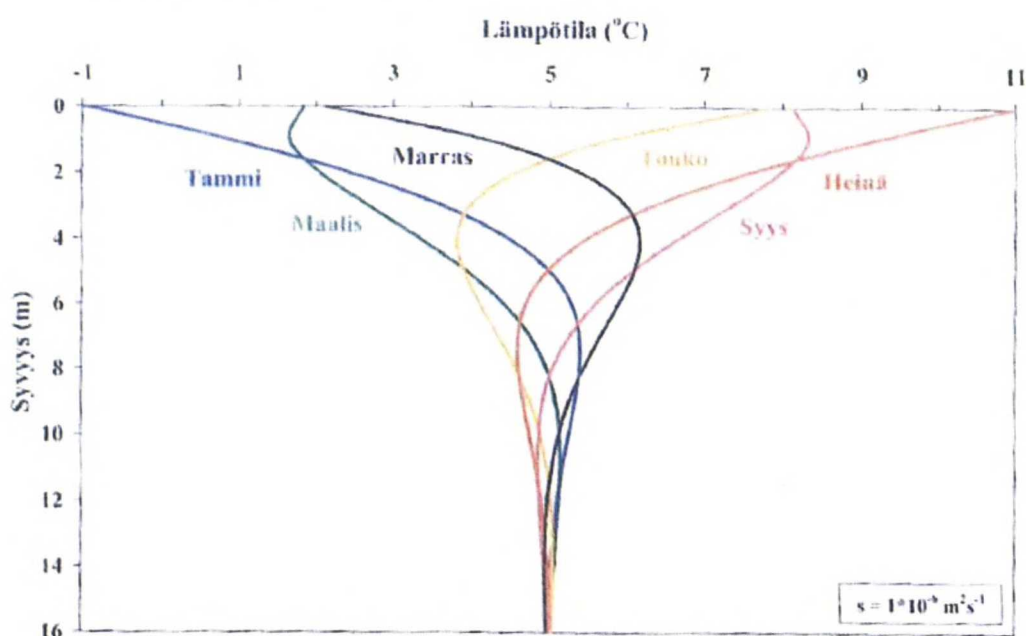
Markkinoilta on saatavissa teholtaan verrattain pieniä (alle 80 kW) sarjatuotettuja maalämpöpumppuja sekä teholtaan suuria kohdetta varten räätälöityjä lämpöpumppuja. Pienten lämpöpumppujen käyttö toimistorakennuksissa vaatii useiden lämpöpumppujen kytkemistä sarjaan. Sekä pienten sarjaan kytkettyjen lämpöpumppujen että yhden ison käyttämisellä on omat etunsa. Huoltotöiden kannalta useiden pienten lämpöpumppujen käyttäminen on parempi ratkaisu. Tällöin maalämpöjärjestelmää ei tarvitse kytkeä kokonaan pois huoltotöiden ajaksi. Yhden suuren lämpöpumpun käyttämisellä on se etu, että tällöin lämpöpumppu on erikseen kohdetta varten räätälöity. Näin voidaan lämpöpumpun suunnittelussa ottaa huomioon kyseisen kohteen erityistarpeet. (Stammeier 2010)

Maalämpöjärjestelmän oikea mitoitus on tärkeää järjestelmän toiminnan kannalta. Jos maasta otetaan liikaa lämpöä, vaarana on maaperän kylmeneminen ajan mittaan. Tällöin järjestelmästä saatava lämpö vähenee jatkuvasti ja sähkön kulutus kasvaa. Tämänkaltaiset virheet järjestelmän mitoituksessa voivat tulla ilmi vasta vuosien käytön jälkeen. Maalämpöjärjestelmää ei yleensä taloudellisista syistä kannata mitoittaa kattamaan rakennuksen koko tehontarvetta. Tämä johtuu maalämpöjärjestelmien korkeista investointikustannuksista. Ruotsissa tehtyjen tutkimusten mukaan on taloudellisesti kannattavinta mitoittaa maalämpöpumppu yleensä 50–60 %:n teholle lämmityksen maksimitehontarpeesta. Tällöin maalämpöpumppu tuottaa noin 90 % rakennuksen lämmitysenergiasta. Loput 50–60 % tarvittavasta lämmitystehosta voidaan tuottaa esimerkiksi sähkövastuksilla. Maalämpöjärjestelmä on taloudellisesti kannattavampi, jos sitä käytetään myös jäähdytyksen tuottamiseen. (Stammeier 2010)

Maalämpöpumput käyttävät lämmönlähteenään yleensä maaperää, vaikka vesistönkin käyttö lämmönlähteenä on mahdollista. Maaperän lämpö on peräisin auringon säteilystä ja maan sisäisistä lämmönlähteistä (mm. maan kasautumisen aiheuttama potentiaalienergia ja radioaktiivisten aineiden hajoaminen). Lämmönkeruuputkisto aiheuttaa maalämpöjärjestelmässä suurimmat kustannukset. Putkisto voidaan asentaa maaperään kahdella tavalla. Se voidaan asentaa vaakatasoon noin metrin syvyyteen. Tämä asennustapa on ollut yleinen aikaisemmin, mutta sen suosio on vähentynyt viimeaikoina sen vaatimaan suuren pinta-alan vuoksi. Viimeaikoina on yleistynyt toinen vaihtoehto, jossa putket asennetaan kallioon porattavaan pystysuoraan reikään, ns. lämpökaivoon. Tällä tavalla lämpöä saadaan vähintään kaksi kertaa enemmän putkimetriä kohden verrattuna vaakaputkistoon. Tavoitteena on, että putkessa kulkevan nesteen lämpötila nousee mahdollisimman korkeaksi. Syvät putkistot kuitenkin jäähdyttävät maaperää enemmän. Tästä aiheutuva vaara voidaan ehkäistä asentamalla putket maaperään harvasti. Erillisten lämpökaivojen etäisyys toisistaan tulisi tämän takia olla vähintään 15 m. Putkien ja lämpökaivojen asentaminen harvempaan parantaa myös yleensä järjestelmän lämpökerointia. Nyrkkisääntönä on, että maaperästä voidaan saada korkeintaan 20–30 W/m lämpöä. Käytännössä lämpökaivon maksimisyvyys on noin 200 m. (Stammeier 2010)

Suomessa maanpinnan keskilämpötila on mittauksien mukaan pari astetta korkeampi kuin ilman keskilämpötila. Maanpinnan lämpötilavaihtelut vaikuttavat maan lämpötilaan sitä vähemmän, mitä syvemmälle mennään (kts. Kuva 15). Yli 15 m:n syvyydessä maanpinnan lämpötilavaihteluilla ei enää ole vaikutusta, vaan maaperän lämpötila on noin keskiarvo vuotuisista maan pintalämpötilan vaihteluista. Kun mennään tästä syvemmälle, ns. geometrinen gradientti nostaa maaperän lämpötilaa noin asteen sataa

metriä kohden. Mitä enemmän porakaivosta tulee saada tehoa, sitä syvempi sen pitää olla. EANDIS-yhtiön Belgiassa sijaitsevaa pääkonttoria varten on porattu 90 pystysuoraa porakaivoa, joiden syvyys on 125 m. Maalämpöjärjestelmän lämmitysteho on 500 kW ja jäähdytysteho 400 kW. Norjassa taas sijaitsee toimistorakennuskortteli, jota varten on porattu 20 lämpökaivoa, joiden syvyys on 175 m. Järjestelmän lämmitysteho on 240 kW ja jäähdytysteho 325 kW. Hieman pienemmän teholuokan esimerkki taas löytyy Saksan Aachenista. Aachenissa sijaitsevassa toimistotalossa on käytössä 28 kappaletta 48 m:n syvyistä porakaivoa. Järjestelmä lämmitysteho on 56 kW ja jäähdytysteho 54 kW. Nämä esimerkit antavat jonkinlaista kuvaa tyypillisestä porakaivojen syvyydestä ja lukumäärästä toimistorakennusten maalämpöjärjestelmissä. Käytännössä porakaivojen toimintaan vaikuttaa useita suunnitteluvaiheessa tuntemattomia tekijöitä. Tällaisia ovat mm. maaperän termiset ominaisuudet, mahdolliset halkeamat kalliossa sekä pohjaveden virtaamat. (Stammeier 2010)



Kuva 15 Maaperän lämpötila syvyyden funktiona eri kuukausina (Stammeier 2010)

Toimistorakennusten tapauksessa maalämpöjärjestelmä kilpailee usein sellaista kokoonpanoa vastaan, jossa kaukolämpö hoitaa rakennuksen lämmityksen ja erillinen vedenjäähdytyskone jäähdytyksen. Stammeier (2010) vertaili diplomityössään näitä vaihtoehtoja. Kohteena laskelmissa oli viisikerroksinen toimistorakennus (bruttoala 4580 brm^2 , suurin tilojen lämmitysteho 208,1 kW, rakenteet SRMK C3:n mukaisia). Tilojen lämmitystehosta 126 kW katettiin maalämmöllä. Näin päästiin viidentoista vuoden laskenta-ajalla 3,87 keskimääräiseen lämpökertoimeen. Maalämpöjärjestelmä tuli elinkaarikustannuksiltaan vaihtoehtojärjestelmää (kaukolämpö + vedenjäähdytyskone) edullisemmaksi noin 5,5 vuoden käytön jälkeen. (Stammeier 2010)

5.6 Jäähdytystarpeen vähentäminen

Rakennuksen jäähdytystarve muodostuu rakennuksen sisäisistä ja ulkoisista lämpökuormista. Käyttäjälaitteiden ja ihmisten aiheuttamiin lämpökuormiin on hankala vai-

kuttaa suunnittelun keinoin. Valaistuksen ja auringonsäteilyn aiheuttamiin lämpökuormiin voidaan kuitenkin vaikuttaa. Parantamalla valaistuksen energiatehokkuutta vähennetään myös sen aiheuttamaa jäähdytystarvetta. Tätä on käsitelty kohdassa 5.4. Seuraavaksi käsitellään niitä suunnitteluratkaisuja, joilla auringonsäteilyn aiheuttamaa jäähdytystarvetta voidaan pienentää.

Auringonsäteily aiheuttaa kesällä suuren osuuden rakennuksen lämpökuormasta (jäähdytystarpeesta). Tämän osuuden suuruuteen vaikuttavat mm. rakennuksen suuntaus ja muoto sekä ikkunoiden pinta-ala ja läpäisevyys. Osuutta voidaan leikata käyttämällä erilaisia varjostimia tai auringonsuojalaseja ikkunoissa. Toinen käyttökelpoinen tapa rakennuksen jäähdytystarpeen vähentämiseen on yötuuletus, jossa käytetään hyväksi yöaikaisia matalampia ulkoilman lämpötiloja.

Varjostimien käytöllä voidaan vähentää rakennuksen lämpökuormaa ja häikäisyongelmia. Varjostimet voivat olla joko aktiivisia tai passiivisia auringonsuojamenetelmiä. Auringonsuojajärjestelmää pidetään aktiivisena silloin, kun järjestelmä torjuu auringonsäteilyä jäähdytyskaudella, mutta mahdollistaa auringonsäteilyn hyödyntämisen lämmityskaudella. Passiivisia auringonsuojajärjestelmiä ovat ne, jotka vähentävät auringonsäteilyä silloinkin, kun lämpöä voitaisiin hyödyntää. Markiisit ja kiinteät ulkopuoliset aurinkosuojaukset ovat pääosin passiivisia menetelmiä, vaikka ne joissain tapauksissa voidaan (manuaalisesti) nostaa tai laskea tarpeen mukaan. Ne voivat lisätä jonkin verran rakennuksen lämmitysenergian tarvetta kevät- ja syyskaudella, mutta voivat merkittävästi vähentää jäähdytysenergian tarvetta kesän aikana. Kokonaisuhyöty jää tällöin positiiviseksi. Ongelmia markiisien käytössä voi aiheuttaa niiden huono pitkäaikaiskestävyys säätekijöitä vastaan. Auringonsuojaus voidaan toteuttaa myös säle- tai rullakaihtimilla. Näistä on olemassa sekä ulko- että sisäpuolelle tulevia ratkaisuja. Jäähdytysenergian kulutuksen kannalta kaihtimet kannattaa ehdottomasti sijoittaa ulkopuolelle. Sisäpuolella olevat kaihtimet eivät auta merkittävästi lämpökuormien pienentämisessä, sillä auringonsäteilyn mukanaan tuoma lämpö on tuolloin jo päässyt rakennukseen sisälle osuessaan kaihtimiin. Sisäpuolelle sijoitettavien kaihtimien etuja ovat kuitenkin parempi kestävyys, edullisuus ja pienempi huoltotarve. Säle- ja rullakaihtimien käyttö parantaa myös ikkunoiden lämmöneristävyttä, vaikka tätä ei usein tiedostetakaan. Suurin paranus ikkunan lämmöneristävydessä saavutetaan, kun kaihtimet sijoitetaan lämmöneristysominaisuuksiltaan heikon ikkunan lasien väliin. (Holopainen et al. 2007, s. 67)

Säle- ja rullakaihtimia voidaan hallita myös automaattisesti esimerkiksi ikkunaan osuvan auringonsäteilyn voimakkuuden mukaan. Näin voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä jäähdytysenergian kulutuksessa. Montrealissa sijaitsevalle toimistorakennukselle (julkisivu etelää kohti) simuloitiin jäähdytys- ja sähköenergian kulutusta käyttäen varjostimien ja sähkövalaistuksen hallintaa yhdessä. Varjostimet olivat ikkunoiden ulkopuolille sijoitettuja rullakaihtimia (auringonsäteilyn läpäisevyys 20 %). Näin saavutettiin jopa 50 %:n säästö vuosittaisessa jäähdytysenergian kulutuksessa verrattuna tilanteeseen, jossa varjostusta ei käytetty. Varjostuksen käyttö kuitenkin lisää valaistuksen sähkönkulutusta, mistä johtuen kokonaisenergiankulutuksen säästö oli vain 12 %. Varjostuksen lisäksi ikkunoiden aiheuttamiin lämpökuormiin vaikuttavat mm. ikkunoiden pinnoite ja niiden kokonaispinta-ala. (Tzempelikos & Athienitis 2007)

Auringonsuojalaseja on tarjolla markkinoilla runsaasti erilaisia. Lasit eroavat toisistaan mm. värin, valonläpäisevyyden ja heijastusominaisuuksien perusteella. Nyrkkisääntönä

auringonsuojalaseilla on, että mitä vähemmän ne läpäisevät näkyvää valoa, sitä vähemmän ne myös läpäisevät lämpösäteilyä. Auringonsuojalasit ovat yleensä passiivisia keinoja suojautua auringonsäteilyltä. On kuitenkin olemassa myös sellaisia auringonsuojalaseja, joiden auringonsäteilyn läpäisevyyttä voidaan muuttaa esimerkiksi sähkövirran avulla. Näin voidaan ehkäistä säteilyn aiheuttamia lämpökuormia jäähdytyskaudella, mutta kuitenkin hyödyntää auringonsäteilyn mukanaan tuoma ilmaisenergia lämmityskaudella. Näin toimivia lasia kutsutaan älylaseiksi (engl. smart glass). Dussault et al. (2012) selvittivät älyikkunoiden energiansäästöpotentiaalia simuloinneilla. Simuloinnit tehtiin Kanadan Quebecissa sijaitsevalle rakennukselle. Tarkastelukohteena oli huone, jonka ainoa ulkoseinä oli kokonaan lasia. Lasiseinän valonläpäisevyyttä säädettiin tarpeen mukaan muuttamalla siinä kulkevan sähkövirran suuruutta. Tämän huoneen lämmitys- ja jäähdytysenergiankulutusta verrattiin sellaisten huoneiden kulutukseen, joissa ulkoseinä oli tavallista lasia (tavallinen argontäyteinen lasi, matalaenergialasi sekä erittäin tehokas matalaenergialasi). Käyttämällä älykästä lasia, saavutettiin 3–33 %:n säästöt lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutuksessa verrattuna matalaenergialaseihin. Tavalliseen lasiin verrattuna säästöt olivat jopa 45–53 %. Säästöjen suuruus riippuu siitä, mihin ilmansuuntaan päin huoneen ulkoseinä on. Suurimmat säästöt saavutettiin niissä tapauksissa, jossa ulkoseinä oli etelään tai länteen päin. Älylaseja käyttämällä voidaan siis saavuttaa merkittäviä säästöjä rakennuksen energiankulutuksessa. Älylasien käyttöön liittyy kuitenkin muutamia ongelmia, joista suurin on niiden hinta. Jotta älylasien käyttö rakentamisessa voisi yleistyä, tulisi niiden hinnan laskea merkittävästi. Lisäksi ongelmia aiheuttavat kestävyys, tummenemisen ja vaalenemisen hitaus sekä rajallinen tummuuskapasiteetti (Holopainen et al. 2007, s. 72).

Rakennuksen jäähdytystarvetta voidaan vähentää myös käyttämällä hyväksi yötuuletusta. Yötuuleuksessa rakennuksen sisälle johdetaan ulkoilmaa yöaikaan, kun ulkoilma on viileämpää kuin päivällä. Näin saadaan rakenteet viilenemään yön aikana, jolloin jäähdytystarve päivän aikana on pienempi. Yötuuletus voidaan toteuttaa joko mekaanisesti tai passiivisesti. Mekaaninen yötuuletus tarkoittaa ilmanvaihtojärjestelmän käyttämistä yötuuletukseen. Mekaaninen yötuuletus kuluttaa sähköä, mutta on passiivista yötuule- tusta vähemmän alttiimpi sään vaikutuksille. Passiivisessa yötuuleuksessa ilman an- ne- taan virrata painovoimaisesti ikkunoista sisään. Passiivinen yötuuletus ei kuluta sähköä, mutta toimii heikosti yöllisen ulko- ja sisäilman lämpötilaeron ollessa pieni. Yötuule- tuksen hyötyvaikutusta arvioitaessa sisä- ja ulkolämpötilan ero yöaikaan nousee merkit- tävimpään asemaan. Lisäksi rakennuksen lämpökapasiteetin suuruudella on merkittävä vaikutus yötuuletuksen höydyllisyyteen. Tästä syystä faasimuutosmateriaaleilla (kts. kohta 5.1.2) voidaan tehostaa yötuuletuksen vaikutusta merkittävästi. Yötuuletuksen teho on suurimmillaan aamuyöllä juuri ennen auringonnousua, sillä tällöin ulkoilma on viileimmillään. Mittauksissa huoneilman keskimääräinen jäähtyminen yötuuletuksen ansiosta oli välillä 0,4–1,6 °C ilmanvaihtokertoimen ollessa 5–30 1/h (Holopainen et al. 2007, s. 72). Yötuuletus on toimiva tapa jäähdytystarpeen vähentämiseen erityisesti Suomessa. Tämä johtuu verrattain alhaisista yöllisistä ulkoilman lämpötiloista kesäai- kaan. (Artmann et al. 2007)

6 Hiilijalanjäljen laskennan kuvaus

Hiilijalanjälki on ensisijaisesti ympäristötehokkuuden mittari. Se voidaan laskea rakennuksen lisäksi mm. organisaation toiminnalle, tuotteelle tai jopa henkilölle. Hiilijalanjälki kertoo tarkasteltavan kohteen CO₂-ekvivalentit kasvihuonekaasupäästöt massayksiköissä (kg tai tn). CO₂-ekvivalenteilla päästöillä tarkoitetaan sitä, että muiden kasvihuonekaasujen kuin hiilidioksidin ilmastoa lämmittävä vaikutus muunnetaan kertoimella vastaamaan hiilidioksidin ilmastovaikutusta. Kasvihuonekaasujen ilmastoa lämmittävää vaikutusta kuvataan GWP-indeksillä (Global-warming potential). GWP-indeksi lasketaan yleensä kahdenkymmenen, sadan tai viidensadan vuoden aikavälille. CO₂:n ilmastovaikutus toimii GWP-indeksin pohjana, minkä vuoksi sen GWP-indeksi on 1. Esimerkiksi metaanille sadan vuoden GWP-indeksi on 25 (Intergovernmental Panel on Climate Change 2007). Yksi kilogramma metaania lämmittää siis ilmastoa 25 kertaa enemmän kuin yksi kilogramma hiilidioksidia.

Rakennuksen hiilijalanjäljellä tarkoitetaan rakennuksen aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä tietyn ajanjakson (käytön hiilijalanjälki) tai koko sen elinkaaren aikana. Koko elinkaaren hiilijalanjälki sisältää kaikki rakennuksen aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt sen rakennusmateriaalien tuotosta rakennuksen purkuun ja jäljelle jäävien jätteiden käsittelyyn. Se ei kuitenkaan yleensä sisällä yksin rakennuksen käyttäjän toimista aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä. Näin esim. huonekalujen valmistuksen sekä toimistolaitteiden kuluttaman energian tuoton aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt jäävät tarkastelun ulkopuolelle. Käytön hiilijalanjälki taas kertoo rakennuksen käytön aiheuttaman hiilijalanjäljen yleensä yhden vuoden aikana. Käytön hiilijalanjälkeä käsitellään kohdassa 3.2.2. (Green Building Council Finland 2013b)

Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki mittarina ja indikaattorina mahdollistaa ympäristötehokkaiden rakennusten suunnittelun sekä niiden arvioinnin ja vertailun. Sitä voidaan käyttää hyödyksi mm. julkisessa tiedottamisessa ja sidosryhmäviestinnässä. Laskennallista rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeä käytetään etenkin hankesuunnitteluvaiheessa. Ympäristötehokkaan rakennuksen suunnittelu edellyttääkin monien asioiden huomiointia mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Rakennuksen hiilijalanjälki koostuu aina lukuisista erilaisista osa-alueista, minkä vuoksi laskennan taserajat on tärkeä määritellä huolellisesti. Näin vältetään päästöjen ja päästövähennysten kaksoislaskennalta.

Tässä luvussa kuvataan miten rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki lasketaan. Kuvailtua laskentamenetelmää käytetään soveltuvin osin luvussa 7, jossa lasketaan hiilijalanjäljet eri laskentatapauksille. Menetelmä perustuu standardiin SFS-EN 15978 (2012) sekä Green Building Council Finlandin (2013) julkaisuun ”Rakennusten elinkaarimittarit”, jossa kyseisessä standardissa esitettyä laskentamenetelmää on avattu sekä osin tarkennettu. Julkaisu ja siinä esitetty elinkaaren hiilijalanjäljen laskentamenetelmä on peräisin Värkki-projektista, jota on käsitelty enemmän kohdassa 3.2.

Käytetty menetelmä koostuu moduuleista, joista kukin käsittää yhden osa-alueen rakennuksen hiilijalanjäljestä (kts. Taulukko 4). Moduulit A1-A5 kuvaavat rakennusvaiheen hiilijalanjälkeä, moduulit B1-B7 käyttövaihetta ja moduulit C1-C4 purkuvaihetta. Lisäksi moduuli D kuvaa rakennuksen elinkaaren ulkopuolisia vaikutuksia, joita ei oteta huomioon varsinaisessa laskennassa, mutta jotka voidaan kuitenkin sisällyttää laskentareporttiin lisätietoina.

Taulukko 4 Hiilijalanjäljen laskennan moduulit (Green Building Council Finland 2013b)

VAIHE	VAIHEEN KESKEINEN SISÄLTÖ
A1-A3 TUOTEVAIHE	Rakennustuotteiden koko valmistusketjun päästöt EN 15804 mukaisesti. Laskenta huomioi vain rakennuksen ja sen osat, eikä esim. huonekaluja tai käyttäjien laitteita. Rakennustuotteita koskevat rajaukset on esitetty tarkemmin kappaleessa 7.1.1.
A4 KULJETUKSET TYÖMAALLE	Rakennustuotteiden ja koneiden kuljetukset, kuljetuksista aiheutuva hävikki. Maansiirto, jossa siirrellään tai vaihdetaan maa-aineksia. Työvoiman kuljetuksia ei huomioida.
A5 TYÖMAATOIMINNOT	Kaikki työmaan toiminnot, sisältää maansiirron, varastoinnin, energiankäytön, jätehuollon ja väliaikaiset rakenteet (kuten valumuotit ja suojamateriaalit). Työkoneiden ja muiden käytettävien koneiden ja laitteiden valmistuksen päästöjä ei huomioida.
B1 KÄYTTÖ	Kylmäainevuodot ja mahdolliset muut suorat kasvihuonekaasupäästöt ilmakehään.
B2 KUNNOSSAPITO	Huollossa, ylläpidossa ja siivouksessa käytettävät tuotantopanokset ja näiden kuljetus ja jätehuolto. Ylläpidolla tarkoitetaan tässä suunniteltua ja ennakoitua ylläpitoa. Pintojen maalaus ja ulkoalueiden hoidon energian kulutus kuuluvat tähän osa-alueeseen.
B3 KORJAUS	Rikkoutuneiden rakennusosien korjaamiseen tarvittavat materiaalit ja niiden käsittely sekä rikkoutuneiden osien jätteen käsittely. Korjaus kohdistuu rikkoutumisiin, joita ei ole suunniteltu tai ennakoitu.
B4 OSIEN VAIHTO	Merkittävien rakennusosien suunniteltu vaihto niiden teknisen tai taloudellisen elinkaaren päässä. Esim. ilmanvaihtokoneen tai ikkunoiden vaihtaminen, kattopäällysteen uusiminen tai energiarakennelmien vaihtaminen. Sisältää osien kuljetukset ja vaihdettujen osien ja muun syntyneen jätteen käsittelyn. Tässä tarkoitettavat osat vaihdetaan toiminnallisesti vastaaviin osiin (muuten kyseessä on muuntaminen).
B5 LAAJAMITTAISET KORJAUKSET	Rakennuksen merkittävä korjaus tai muuntaminen, kuten peruskorjaus, tilaohjelman muutos, rakennuksen vaipan muunnokset, tai energiaratkaisujen muutokset. Jos tarkasteltu rakennushanke on muutoshanke, kohdistuvat päästöt tähän vaiheeseen. Vaihe kattaa prosessissa käytetyt materiaalit, jätehuollon, logistiikan ja prosessissa kulutetun energian päästöt. Peruskorjaus sisältää putkien, sähköjen ja vesikaton korjaukset sekä tekniikan ja ovien ja ikkunoiden vaihdon, jos ei voida osoittaa muuta.
B6 ENERGIAN KÄYTTÖ	Sisältää kaiken rakennuksen järjestelmien kuluttaman rakennukseen ulkopuolelta tuodun energian, jota käytetään lämmitykseen, lämpimän käyttöveden tuottamiseen, ilmanvaihtoon, jäähdytykseen, valaistukseen tai rakennusautomaatioon. Sisältää myös muun tontilla kulutetun energian kuten pihavalaisukset tai sulatukset. Ei sisällä kuluttajalaitteiden energiaa (esim. viihde-elektronikka, kodinkoneet, tietokoneet). Niin haluttaessa voidaan raportoida erillisiä kuluttajalaitteita huomioivia lisäskenaarioita. Katso 7.3 Rakennuksen energiavirtoja ja kuljetuksia koskevan tiedon vaatimukset.
B7 VEDEN KÄYTTÖ	Sisältää puhtaan veden tuotannon ja tuotetun jäteveden käsittelyn päästöt käytön ajalta. Veden kulutuksessa ei tulisi huomioida kuluttajalaitteiden (kuten pyykin- ja astianpesukoneiden) kulutusta. Haluttaessa nämä voidaan raportoida erillisessä lisäskenaariossa. Rajaus sisältää tontilla tapahtuvan kulutuksen (esim. kastelu).
C1 PURKAMINEN	Rakennuksen purkaminen rakennuspaikalla ja sen välittömässä läheisyydessä ja tähän liittyvien koneiden käyttämä energia ja koneiden kuljetukset.
C2 PURKUVAIHEEN KULJETUKSET	Kaikki purkujätteestä ja työkaluista aiheutuva kuljetus End-of-Waste tilaan saakka, huomioiden mahdolliset välivarastointi- ja siirtokuormauskuljetukset.
C3 PURKUJÄTTEEN KÄSITTELY	Kaikki jätteen käsittelyn vaiheet, kunnes jäte saavuttaa End-of-Waste tilan. Määrittelyn kriteerit ovat: a) syntyneellä raaka-aineella on tunnettu käyttö-tarkoitus, b) jolle on kysyntää markkinoilla (mahdollisesti positiivinen ostohinta), c) raaka-aine täyttää käyttötarkoituksen vaatimat tekniset ja muut ominaisuudet ja d) raaka-aineen käyttö ei vaaranna ympäristöä tai ihmisten terveyttä.
C4 PURKUJÄTTEEN LOPPUSIJOITUS	Kaikki sellaisen jätteen käsittelystä syntyvät päästöt, jonka käsittelytapa on loppusijoitus tai energian tuotanto, ja jonka elinkaari päättyy lopullisesti.
D ELINKAAREN ULKO-PUOLISET VAIKUTUKSET	Katso 7.5 D: Elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset.

6.1 Rakennusvaihe

Rakennusvaiheen hiilijalanjälki koostuu kasvihuonekaasupäästöistä, jotka syntyvät rakennustuotteiden valmistusketjussa, rakennustuotteiden ja koneiden kuljetuksista työmaalle sekä työmaan toiminnoista. Moduulit A1-A3 kuvaavat rakennustuotteiden valmistusketjun päästöjä raakamateriaalista tehtaan porteille (cradle to gate). Moduuliin A1 sisältyy raakamateriaalin hankinta, käsittely ja mahdollisesti sekundaaristen materiaalien käsittely (kierrätysmateriaali). Moduuli A2 taas pitää sisällään raaka-aineiden kuljetuksen rakennustuotteen valmistajalle (ei vielä työmaalle). Rakennustuotteen valmistusketjun viimeinen moduuli A3 käsittää tuotantoprosessit tehtaalla, joiden tuloksena on valmis tuote työmaalla käytettäväksi. Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen laskennassa moduulit A1-A3 yleensä käsitellään yhtenä pakettina (tuotevaihe).

Laskennassa käytetään mieluiten standardin SFS-EN 15804 (2012) mukaisen ympäristötuoteselosteen ilmoittamia päästöjä kyseiselle tuotteelle (ensisijaisesti) tai tuoteryhmälle (toissijaisesti). Jos on mahdollista, niin rakennustuotteiden päästöt ilmoitetaan toiminnallista yksikköä kohden (esim. kg CO₂ ekv/seinäelementti). Usein toiminnalliset yksiköt eivät kuitenkaan vielä laskentavaiheessa ole selvillä. Tällöin rakennustuotteiden päästöt ilmoitetaan määräyksikköä kohden (esim. kg CO₂ ekv/kg). Koska rakennusprojektissa käytetään lukuisia erilaisia materiaaleja ja osia, on tärkeä täsmentää, mitkä kaikki ovat ne rakennustuotteet joiden valmistusketjun päästöt tulee ottaa huomioon rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen laskennassa (kts. Taulukko 5). Mikäli rakennuksessa käytetään uusiomateriaaleja, näiden tuotteiden alkuperäisen valmistuksen päästöjä ei enää tarvitse ottaa huomioon. Ylijäämämateriaalin tapauksessa huomioidaan vain kuljetus ja asennus. Jättemateriaalin tapauksessa huomioidaan näiden lisäksi vielä jalostamisesta aiheutuvat päästöt. Rakennustuotteiden valmistusketjun päästöt ovat tyypillisesti rakennusvaiheen hiilijalanjäljen merkittävin osa.

Taulukko 5 Rakennustuotteiden rajaukset laskennassa (Green Building Council Finland 2013b)

Osa-alue	Huomioidaan	Ei huomioida
Aluerakentaminen	Tuotu maa- ja kiviaines, vahvistukset ja päällysteet tontin alueella	Pilaantuneen maan kunnostus, vanhan rakennuksen purku
Alue- ja piharakenteet	Suuret kokonaisuudet (esim. leikki-puistot)	Yksittäiset ja vähämerkitykselliset piharakenteet
Pintamateriaalit	Suojaavat materiaalit, maalit ja pinnoitteet	Tapetointi, verhot, matot ja muu sisustus
Kalusteet		Kalusteita ei huomioida
Tekniikkaosat	Rakennuksen olosuhteita tuottavat järjestelmät (LVI-tekniikka, automaatio ja hissit)	Käyttäjän palveluita tuottavat kokonaisuudet (esim. kaupan kylmäjärjestelmät, toimistolaitteet)
Väliaikaiset rakenteet	Ne joissa kulutetaan pysyvästi energiaa tai materiaaleja (moduuli A5) (esim. valutöiden tukirakenteet)	Pääomahyödykkeet, joita voidaan käyttää uudelleen sellaisenaan (esim. työmaahissit)
Tukirakennukset	Rakennuksen toimintaan kuuluvat (esim. pysäköintihallit)	-

Moduuli A4 käsittää rakennustuotteiden ja koneiden kuljetukset työmaalle sisältäen koko jakelureitin (ml. mahdolliset välivarastot). Tähän kohtaan kuuluu myös maansiirto, jossa siirrellään tai vaihdetaan maa-aineksia. Työvoiman kuljetusta työmaalle ei kuitenkaan huomioida. Jos rakennustuotteita siirretään rakennusliikkeen toimesta työmaiden välillä, niin lasketaan päästöt keskimääräisellä kuljetusmatkalla. Kuljetusten päästökertoimina voidaan käyttää esimerkiksi VTT:n (2012) LIPASTO-tietokantaa, josta löytyy eri kuljetusmuodoilla laskettuja päästökertoimia. LIPASTO on VTT:ssä toteutettu Suomen liikenteen pakokaasujen ja energiankulutuksen laskentajärjestelmä. Järjestelmä sisältää koko maan käyttöön tarkoitetun yksikköpäästöjen tietokannan. Yksikköpäästöillä tarkoitetaan kulkuneuvojen päästöjä kuljetettua massa- tai henkilöyksikköä ja pituusyksikköä kohden. Moduulin A4 laskennassa käyttökelpoinen yksikkö on g CO₂ ekv/tn,km (grammaa per tonnikiometri).

Rakennusvaiheen viimeinen moduuli A5 sisältää kaikki työmaan toiminnot. Tähän moduuliin kuuluvat siis mm. maatyöt, tuotteiden varastointi, väliaikaiset rakenteet (siltä osin kun näissä kulutetaan pysyvästi energiaa tai materiaalia), työmaalla tapahtuva tuotteiden käsittely ja asentaminen sekä rakennusaikainen energian ja veden käyttö. Energiaa työmaalla kuluu mm. rakennuskoneiden käyttöön, materiaalin liikutteluun työmaan sisällä ja työmaakoppien valaisemiseen sekä lämmittämiseen. Työkoneiden ja muiden käytettävien laitteiden valmistuksen päästöjä ei lasketa mukaan, sillä niitä ei valmisteta vain yhdessä rakennusprojektissa käytettäväksi.

6.2 Käyttövaihe

Käyttövaihe ulottuu rakennuksen käyttöönotosta sen purkamiseen. Käyttövaihe on sen aikaisen energiankäytön vuoksi ylivoimaisesti merkittävin vaihe rakennuksen hiilijalanjäljen kannalta. Jopa passiivitason asuinkerrostalossa käytönajan energia muodostaa elinkaaren hiilijalanjäljestä noin 70 % (Pasanen et al. 2011, s. 21). Käyttövaihe sisältää energian ja vedenkulutuksen lisäksi kaikki rakennukselle suoritettavat kunnossapitotoimenpiteet, korjaukset ja osien vaihdot. Käyttövaihe koostuu moduuleista B1-B7.

Moduuli B1 sisältää tavanomaisen käytön aikaiset suorat kasvihuonekaasupäästöt ilma-kehään. Tähän moduuliin kuuluvat siis esimerkiksi kylmäainevuodot ja rakennuksen pinnoilta ilma-kehään haihtuvat kasvihuonekaasut. Seuraavaan moduuliin B2 vuorostaan kuuluvat kaikki rakennuksen ennakoitavaan ylläpitoon liittyvät toimet. Tähän osaluokkaan luetaan sekä rakennuksen sisäpuolen, että ulkopuolen puhtaanapito sekä teknisten järjestelmien kunnossapito (maalaminen, lämmöntuottolaitteiston vuosihuollot, ilmanvaihtokoneen suodattimien vaihtaminen, yms.). Moduulin B2 päästöt koostuvat siis ylläpidossa käytettävien tuotteiden ja energian tuottamisesta aiheutuvista päästöistä (maalit, siivouskemikaalit, pinnoitteet, laitteiden öljyt, yms.).

Moduuliin B3 kuuluu sellaisten rikkoutuneiden rakennusosien korjaaminen tai vaihtaminen, joiden korjaamista ei ole voitu suunnitella tai ennakoida. Rikkoutuneen rakennusosan vaihtamisen päästöt syntyvät korvaavan osan tuotantoprosessista, sen kuljetamisesta paikan päälle, itse korjausprosessista ja viimein rikkoutuneen rakennusosan jätehuollosta (esim. valaisimen tai ikkunan karmin rikkoutuminen).

Moduuli B4 käsittää merkittävien rakennusosien korvaamisen, kun ne ovat tulleet teknisen elinkaarensa päähän. Rakennusosien korvaamisen päästöt luetaan tähän moduuliin

silloin, kun osat vaihdetaan toiminnallisesti vastaaviin osiin. Muussa tapauksessa kyse on muuntamisesta. Päästöt syntyvät samoista asioista kuin moduulissa B3. Ero moduulien B3 ja B4 välillä on, että jälkimmäisessä rakennusosien korvaaminen on ennakoitu ja suunniteltu. Moduulin B4 mukainen rakennusosien korvaus siis toteutetaan, vaikka rakennusosa ei vielä olisikaan varsinaisesti rikkoutunut. Tähän moduuliin kuuluvat siis mm. ilmanvaihtokoneen tai lämmönsiirtimen vaihtaminen, kattopäällysteen uusiminen tai väliseinien korvaaminen.

Viidenteen käyttövaiheen moduuliin (B5) kuuluu rakennuksen merkittävä korjaaminen tai muuntaminen. Tähän moduuliin luetaan siis mm. peruskorjaukset, tilaohjelman ja rakennuksen vaipan muutokset sekä energiaratkaisujen muutokset. Peruskorjauksiin kuuluu putkien, sähköjen ja vesikaton korjaukset sekä tekniikan ja ovien vaihdot. Päästöjä syntyy jälleen uusien rakennustuotteiden tuotannosta, niiden kuljettamisesta paikan päälle, itse rakennusprosessista sekä poistettavien rakennustuotteiden ja rakennusprosessissa syntyvien jätteiden jätehuollosta. Mikäli tarkasteltava rakennushanke on muutoshanke eli esimerkiksi rakennuksen käyttötarkoitus on suunniteltu muutettavaksi jossain rakennuksen elinkaaren vaiheessa, niin tällöin käyttötarkoituksen muuttamisesta aiheutuvat päästöt kohdistuvat tähän moduuliin. Jos taas rakennuksen laaja-alaista korjaamista tai muuntamista ei ole otettu huomioon alkuperäistä hiilijalanjälkeä laskettaessa, niin olisi suositeltua laatia uusi laskenta hiilijalanjäljestä, etenkin jos rakennuksen käyttötarkoitus tai -ikä muuttuu. Uuden laskelman tarkastelujakso ulottuu tällöin muutostöiden alkamisesta rakennuksen purkamiseen ja muutostöiden aiheuttamat päästöt huomioidaan uuden laskennan moduuleissa A1–A5.

Moduuli B6 sisältää kaiken rakennuksen järjestelmien kuluttaman ulkopuolelta tuodun energian. Tähän luokkaan luetaan siis energia, jota käytetään lämmitykseen, lämpimän käyttöveden tuottamiseen, ilmanvaihtoon, jäähdytykseen, valaistukseen, pumppuihin ja rakennusautomaatioon. Mukaan luetaan myös mm. hissien ja liukuportaiden kuluttama energia sekä tontilla kulutettu energia (kuten pihavalaistukset ja sulatukset). Tontilla tapahtuvan käytönajan liikenteen aiheuttamia päästöjä ei kuitenkaan huomioida. Laskennassa ei huomioida myöskään kuluttajalaitteiden käyttämää energiaa. Täten esim. toimistolaitteet, jääkaapit, televisiot ja pesukoneet jäävät tarkastelun ulkopuolelle. Näiden laitteiden kuluttama energia voidaan haluttaessa huomioida energiankäytön lisäskenaarioissa, jotka esitetään laskentaraportissa. Jos rakennuksessa tuotetaan itse energiaa, niin tuotettu energia vähennetään ensisijaisesti rakennuksen järjestelmien energiantarpeesta (vasta toissijaisesti kuluttajalaitteiden käyttämästä energiasta). Sen sijaan rakennuksesta ulos verkkoon myytyä energiaa ei vähennetä rakennuksen energiantarpeesta. Ulos myydystä energiasta voidaan kuitenkin raportoida erikseen moduulissa D, jossa raportoidaan myös rakennuksen järjestelmien tuottama energia kuluttajalaitteiden käyttöön.

Rakennuksen energiankulutus tulee määrittää tavalla, joka kuvaa mahdollisimman hyvin todellisia olosuhteita rakennuksessa ja käyttöpaikkakunnalla. Tämän vuoksi energiankulutuksen määrittämisessä käytetään ensisijaisesti dynaamista energialaskentamenetelmää, joka ottaa huomioon rakennuksen todellisen käyttöprofiilin. SRMK D5:ssä esitettyä kuukausitason standardikäyttöön perustuvaa laskentamenetelmää voidaan käyttää, jos dynaamisen energialaskennan käyttö ei ole mahdollista (Ympäristöministeriö 2007b). Olemassa olevien rakennusten hiilijalanjälkeä laskettaessa voidaan käyttää todellista vähintään yhden vuoden ajalta mitattua kulutusta. Mitattu kulutus lämpötilakor-

jataan, jotta vaihtelevat ilmasto-olosuhteet eivät aiheuta vääristymiä energiankulutukseen. Mittausjakso voi alkaa aikaisintaan vuoden kuluttua rakennuksen käyttöönottamisesta, jotta käyttövaiheen heilahteleva energiankulutus ei aiheuta tulokseen virhettä. Tässä työssä energiankulutuksen laskentaan käytetään Granlundin RIUSKA ohjelmaa. RIUSKA on dynaaminen energialaskentaohjelma, joka ottaa huomioon mm. rakenteiden massiivisuuden, paikkakunnan ilmaston, lämpökuormat ja käyttöajat. Se laskee tunneittain tilojen lämpötilat sekä niiden lämmitys- ja jäähdytystarpeet.

Käytetyn energian päästöjä laskettaessa käytetään tuoreimpia julkaistuja päästökertoimia koko rakennuksen elinkaarelle. Energian päästökertoimissa on otettava huomioon muutkin kuin suoran palamisen päästöt. Päästökerrointa määritettäessä on siis huomioitava mm. raaka-aineen hankkimisesta, kuljettamisesta ja jalostamisesta aiheutuvat päästöt. Valtakunnallisena keskiarvona sähkön päästötasolla käytetään elinkaarilaskennassa arvoa 273 g CO₂ ekv/kWh. Tässä kertoimessa siis huomioidaan koko polttoaineketjun päästöt, minkä vuoksi se on korkeampi kuin kohdassa 2.2.3 esitetty kerroin. Tässä luvussa esitetty kerroin on laskettu vuosien 2007–2011 keskiarvona Tilastokeskuksen aineistosta. Alueellisten energiaratkaisujen (kaukolämpö, -jäähdytys) tapauksessa käytetään paikallisen energialaitoksen päästökertoimia, jos ne ovat saatavilla. Lämmön ja sähkön yhteistuotannon päästöt kohdistetaan energiamuodoille hyödynjakomenetelmän avulla, joka jakaa päästöt perustuen oletukseen siitä miten energia tuotettaisiin erillistuotantona. Menetelmässä oletetaan sähkön tuotannon hyötysuhteeksi 39 % ja lämmön tuotannon hyötysuhteeksi 90 %. Todellisuudessa energiantuotannon päästökerroin ei ole koko rakennuksen elinkaaren ajan vakio, vaan muuttuu ajan kuluessa tekniikan kehittymisen ja viranomaisohjauksen muuttumisen myötä. Tätä ei kuitenkaan huomioida rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeä laskettaessa energiantuotannon päästökehitykseen liittyvien suurien epävarmuuksien vuoksi. Käyttämällä koko rakennuksen elinkaarelle samoja päästökertoimia, voidaan eri rakennuksille laskettuja hiilijalanjälkiä myös vertailla paremmin. Elinkaaren hiilijalanjäljen laskennassa ei voida myöskään koskaan käyttää vihreän sähkön päästökertoimia, sillä vihreän sähkön käyttöä koko rakennuksen elinkaaren ajan ei voida taata. Rakennuksen omistaja voi vaihtua elinkaaren aikana useita kertoja ja jokainen omistaja tekee itse omat päätöksensä sähkön hankinnasta.

Viimeinen rakennuksen käyttöaikaa koskeva moduuli B7 sisältää rakennuksen veden käytön sen normaalitoiminnan aikana. Tähän moduuliin siis kuuluu juomavesi, peseytymis- ja puhtaanapitovesi, lämmin vesi, tontilla tai viherkatolla käytetty kasteluvesi, LVI-laitteiden käyttämä vesi sekä erityisissä järjestelmissä kulutettu vesi (kuten suihkulahteet, uima-altaat ja saunat). Moduuleihin B2-B5 liittyvissä toiminnoissa kulutettu vesi sen sijaan luetaan kuuluvaksi näihin moduuleihin. Mukaan ei myöskään lueta kuluttajalaitteiden, kuten astian- ja pyykinpesukoneiden kuluttamaa vettä. Veden käytön aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt syntyvät raaka- ja jäteveden puhdistusprosesseista sekä veden pumppaamisesta. Raakaveden puhdistamisessa käytetään mm. ferrosulfaattia, klooria ja otsonia, joiden tuotantoketjussa syntyy päästöjä. Tämän lisäksi päästöjä aiheuttaa veden desinfiointi UV-valon avulla. Jäteveden puhdistamisessa vuorostaan käytetään ferrosulfaattia, kalkkia ja metanolia. (Helsingin seudun ympäristöpalvelut 2013)

6.3 Purkaminen

Rakennuksen purkamisvaihe alkaa, kun sen käyttö lopetetaan, eikä rakennukselle ole enää tiedossa jatkokäyttöä. Purkamisvaiheen tarkastelu hiilijalanjäljen laskennassa ulot-

tuu siihen asti kunnes syntynyt jäte saavuttaa ns. End-of-Waste (EoW) tilan tai se loppusijoitetaan. EoW tilalla tarkoitetaan tilaa, jolloin materiaalia ei enää lasketa jätteeksi ja se voidaan käyttää uudestaan. EoW tilan kriteerit ovat: 1) syntyneellä materiaalilla on tunnettu käyttötarkoitus ja 2) sillä on kysyntää markkinoilla (esim. positiivinen ostohinta). 3) Syntynyt materiaali täyttää sen käyttötarkoituksen sekä lainsäädännön ja soveltuvien standardien asettamat tekniset vaatimukset ja 4) ei aiheuta haittaa ihmisten terveydelle tai vaaranna ympäristöä.

Moduuli C1 sisältää päästöt, jotka syntyvät rakennuksen purkamisprosesseissa paikan päällä ja sen välittömässä läheisyydessä. Päästöjä syntyy tässä moduulissa mm. koneiden kuljetuksista paikalle ja niiden käyttämästä energiasta. Rakennuksen elinkaari katsotaan päättyneeksi, kun kaikki komponentit ja materiaalit, jotka on tarkoitettu poistettavaksi sijaintipaikalta, on poistettu ja paikka on valmis tulevaisuuden käyttöä varten. Hiilijalanjäljen laskennassa tarkastelu ei kuitenkaan pääty vielä tähän, vaan päästöjä syntyy vielä jätteiden kuljetuksista ja käsittelyprosesseista. Moduuli C2 sisältää jätteiden kuljetuksista aiheutuvat päästöt. Mukaan luetaan myös matkat mahdollisiin välivarastointi ja -käsittelypaikkoihin ja sieltä pois. Moduuliin C3 kuuluvat kaikki purkujätteen käsittelyn vaiheet siihen asti, kunnes jäte saavuttaa EoW tilan ja voidaan käyttää uudelleen. Kaksoislaskennan välttämiseksi mahdollista materiaalin uusiokäyttöä ei kuitenkaan lueta purettavan rakennuksen hyväksi sen hiilijalanjälkeä laskettaessa. Uusiomateriaalin käyttö voidaan lukea nimittäin hyväksi siinä kohteessa, jossa purettavasta rakennuksesta saatu uusiomateriaali käytetään. Materiaalin uusiokäytöstä rakennuksen elinkaaren jälkeen voidaan kuitenkin raportoida moduulissa D.

Purkuvaiheen viimeiseen moduuliin C4 taas kuuluu kaikki sellaisesta jätteen käsittelystä syntyvät päästöt, joiden tuloksena jäte loppusijoitetaan tai käytetään hyödyksi energiantuotannossa. Jätteiden polttamisesta aiheutuvat päästöt kuuluvat tähän moduuliin riippumatta siitä otetaanko polttamisesta saatu energia talteen vai ei. Jätteiden poltosta tuotettua energiaa ei lueta hyväksi rakennuksen hiilijalanjäljelle. Tästä energiasta voidaan raportoida moduulissa D, kuten uusiomateriaalinkin käytön kohdalla. Kaatopaikalla päästöjä voi vapautua vielä pitkän aikaa jätteiden loppusijoituksen jälkeen. Sääntönä on, että mukaan lasketaan ne päästöt, jotka vapautuvat 100 vuoden sisällä jätteen loppusijoittamisesta.

6.4 Elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset

Osalle rakennuksessa käytetyistä materiaaleista löytyy vielä jatkokäyttöä rakennuksen purkamisen jälkeenkin. Näiden materiaalien elinkaari siis jatkuu. Materiaalia voidaan käyttää uudelleen joko rakennussektorilla tai muilla toimialoilla tai siitä voidaan tuottaa energiaa. Materiaalien uusiokäytöstä tai jätteiden energiantuotannosta saatuja ympäristöhyötyjä ei kuitenkaan kohdisteta takaisin tarkasteltavalle rakennukselle kaksoislaskennan välttämiseksi. Kaksoislaskentaa syntyy esimerkiksi, kun materiaalin tuleva uusiokäyttö luetaan hyödyksi ensin purettavalle rakennukselle ja tämän lisäksi vielä uudelle rakennukselle, jossa uusiomateriaalia käytetään. Käytetyn laskentatavan mukaan käytetty uusiomateriaali voidaan lukea hyödyksi siis vain uuden rakennuksen hiilijalanjälkeä laskettaessa. Tämä tarkoittaa, että uusiomateriaalin alkuperäisen valmistuksen päästöjä ei tarvitse ottaa huomioon uuden rakennuksen hiilijalanjäljen laskennassa.

Elinkaaren ulkopuolisia vaikutuksia käsittelee moduuli D, jonka tarkoitus on selkeyttää rakennuksen elinkaaren rajauksia ja välttää em. kaksoislaskenta. Tämä moduuli myös

mahdollistaa raportoinnin materiaalin kierrätyksestä ja energiantuotannosta saatavista nettoympäristöhyödyistä, vaikka niitä ei luetakaan hyväksi itse hiilijalanjäljen laskennassa. Toisin sanoen, moduuli D tunnustaa rakennustuotteiden suunnittelun uudelleenkäyttöä ja kierrätystä varten. Nämä elinkaaren jälkeiset mahdolliset nettoympäristöhyödyt lasketaan perustuen laskennan hetkellä olemassa olevaan teknologiaan ja nykyisiin menettelytapoihin. Sanalla ”netto” tarkoitetaan tässä, että esimerkiksi rakennusjätteen energiantuotannon ympäristöhyödyistä tulee vähentää sen poltossa tarvittavan apupolttoaineen (esim. hiili) valmistusketjun päästöt.

Moduuli D jaetaan viiteen osa-alueeseen: uudelleenkäyttö, talteenotto, kierrätys, ulkopuolelle myyty energia ja kuluttajalaitteille toimitettu energia. Ensimmäinen osa-alue ”uudelleenkäyttö” koskee niitä materiaaleja, jotka käytetään uudelleen sellaisenaan, ilman välissä tapahtuvaa jalostusprosessia. Uudelleenkäytettäviä materiaaleja syntyy pääosin rakennusprosessissa ja purkujätteen käsittelyssä (moduulit A5 ja C3), mutta myös hieman huolloissa ja korjauksissa (moduulit B3 ja B5). Osa-alue ”talteenotto” taas käsittää rakennusjätteestä tuotetun energian. Energiantuotantoon soveltuvia jätteitä syntyy pääosin samoissa elinkaaren vaiheissa kuin uudelleenkäytettäviäkin materiaaleja. Osa-alue ”kierrätys” kattaa materiaalin uudelleenkäytön jalostusprosessin kautta. Tässä osa-alueessa tarkoitettu jalostusprosessi tarkoittaa siis materiaalin jalostamista EoW tilan saavuttamisen jälkeen tulevaa käyttötarkoitusta varten, eikä tästä prosessista aiheutuvia päästöjä enää lasketa mukaan tarkasteltavan rakennuksen hiilijalanjälkeen. Osa-alue ”ulkopuolelle myyty energia” sisältää rakennuksessa sen käyttöaikana tuotetun ja ulkopuolelle toimitetun energian. Kyseinen osa-alue ei sisällä rakennuksen järjestelmien tuottamaa energiaa, joka kulutetaan rakennuksessa sijaitsevilla kuluttajalaitteilla. Rakennuksen kuluttajalaitteiden käyttöön toimitettu energia kuuluu moduulin D viimeiseen osa-alueeseen. Tämä osa-alue kattaa rakennuksessa tuotetun energian, joka jää yli rakennusten omien järjestelmien tarvitsemasta energiasta. Energia joka tuotetaan rakennuksen omien järjestelmien käyttöön, vähennetään sen sijaan tarvittavasta ostoenergiasta moduulissa B6, energiankäyttö.

6.5 Varhaisen vaiheen laskennan yksinkertaistaminen

Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen vaikuttaminen on sitä helpompaa ja edullisempaa, mitä varhaisemmassa vaiheessa se tehdään. Tämän vuoksi on mielekästä laskea arvio rakennuksen hiilijalanjäljestä mieluiten jo hankevaiheessa. Erityisen hyödyllistä on laskea samalle rakennushankkeelle useita hiilijalanjälkiä erilaisten suunnitteluratkaisujen perusteella, jolloin on mahdollista valita suunnitteluratkaisuista se, jonka aiheuttama hiilijalanjälki on pienin. Toki myös ratkaisujen elinkaarikustannukset toimivat valintakriteerinä. Toisaalta varhaisessa vaiheessa hankkeen päästövaikutukset tunnetaan huominkin kuin myöhemmässä vaiheessa, jolloin suunnittelu- ja laskentatietoa on runsaammin saatavilla (kts. Kuva 16). Varhaisen vaiheen laskennan mahdollistamiseksi sallitaan siksi tiettyjä yksinkertaistuksia. Laskennan kokonaisuuden kannalta vähämerkityksisiä osa-alueita voidaan jättää huomioimatta ja joitain osa-alueita voidaan laskea oletusarvoilla. Yksinkertaistuksia ei kuitenkaan saa käyttää, jos tarkempaa tietoa rakennuksesta on saatavilla. Seuraavaksi luetellaan ne yksinkertaistukset, joita varhaisen vaiheen laskentaan saa tehdä.



Kuva 16 Kyky vaikuttaa rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen ja hankkeen päästövaikutusten tunteminen hankkeen eri vaiheissa

Moduulit A4-A5 voidaan niputtaa yhteen ja laskea oletusarvolla, jos urakkatarjousta ei ole vielä saatu tai urakkasuunnitelmia ei ole vielä laadittu. Tällöin kyseisten moduulien aiheuttamat päästöt voidaan laskea työmaan lämmitysenergialla 200 kWh/brm^2 . Jos käytettävä energiamuoto ei vielä ole tiedossa, niin lasketaan sähköllä.

Moduuli B1 (suorat kasvihuonekaasupäästöt) voidaan jättää huomioimatta, jos kohteeseen ei tule merkittävästi kylmäaineita. Tämän yksinkertaistuksen käyttäminen edellyttää, että rakennuksen jäähdytysteho on alle 40 W/brm^2 . Moduulia B2 (kunnossapito) voidaan yksinkertaistaa, mikäli rakennuksen todellista huolto-ohjelmaa ei vielä laskentavaiheessa tunneta. Tässä tapauksessa voidaan käyttää oletusarvoa $2 \text{ kg CO}_2 \text{ ekv/brm}^2/\text{vuosi}$. Moduuli B3 (ennakoimattomat korjaukset) voidaan jättää huomioimatta, jos korjaustarvetta ei pystytä arvioimaan. Ennakoimattoman korjaustarpeen arviointi onkin tavallisesti melko hankalaa. Moduuli B5 (laajamittaiset korjaukset) voidaan jättää huomioimatta, jos rakennuksen käyttöikä on alle 30 vuotta, tai jos voidaan osoittaa, että rakennus ei tarvitse käyttöikänsä aikana peruskorjausta. Moduulin B6 (energiankäyttö) päästöt voidaan laskea kokonaisuudessaan sähköllä, mikäli rakennuksen lämmitysmuoto ei vielä ole tiedossa. Tämä yksinkertaistus voi kuitenkin kasvattaa rakennuksen laskennallista hiilijalanjälkeä merkittävästi, sillä energiankäytön merkitys rakennuksen hiilijalanjäljessä on hyvin keskeinen. Moduulia B7 (veden käyttö) voidaan tarvittaessa yksinkertaistaa niin, että vedenkulutus lasketaan kokonaiskulutuksella (ml. kuluttajalaitteiden käyttämä vesi), sillä kuluttajalaitteiden osuutta vedenkulutuksesta voi usein olla hankala erottaa rakennuksen kiinteiden järjestelmien vedenkulutuksesta. Teollisuuskohteissa näin ei kuitenkaan voida toimia, sillä vedenkulutus voi tämäntyypisissä kohteissa olla erittäin merkittävää.

Purkuvaihe (moduulit C1-C4) voidaan kokonaisuudessaan laskea oletusarvolla, jos laskenta tehdään ennen kuin rakennuksen massoittelu on tiedossa. Tällöin purkuvaiheen päästöt voidaan laskea oletusarvolla $20 \text{ kg CO}_2 \text{ ekv/brm}^2$.

Yllä kuvatut yksinkertaistukset perustuvat kokemuseräisiin arvoihin toteutuneiden hankkeiden päästövaikutuksista. Esitetyt oletusarvot ovat suuripirteisiä ja jonkin verran yleisiä keskiarvoja suurempia. Toteuttamalla laskenta tarkemmilla tiedoilla saadaan siis todennäköisesti pienempi hiilijalanjälki rakennukselle. Kyseiset oletusarvot eivät myös-

kään sovellu hankkeisiin, joissa käytetään runsaasti tavallisista poikkeavia ratkaisuja tai yleisestä rakentamiskulttuurista poikkeavia toimintatapoja. Laskentaa on myös hyvä tarkentaa aika ajoin hankkeen edetessä, kun uutta tietoa hankkeen päästövaikutuksista tulee saataville.

7 Laskennat

Tässä luvussa tarkastellaan laskennallisesti erilaisten suunnitteluratkaisujen vaikutusta toimistorakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen. Referenssitapauksena on sellainen rakennus, jonka rakenteet ja järjestelmät täyttävät tällä hetkellä voimassa olevat SRMK:n määräykset. Tätä seuraavissa laskentatapauksissa parannetaan rakennuksen energiatehokkuutta vaikuttamalla kussakin laskentatapauksessa aina joihinkin tiettyihin energiatehokkuuden osa-alueisiin. Näin saadaan selville, minkälaisilla energiatehokkuuteen vaikuttavilla keinoilla rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen voidaan tehokkaasti vaikuttaa.

Taulukko 6 Laskentatapaukset

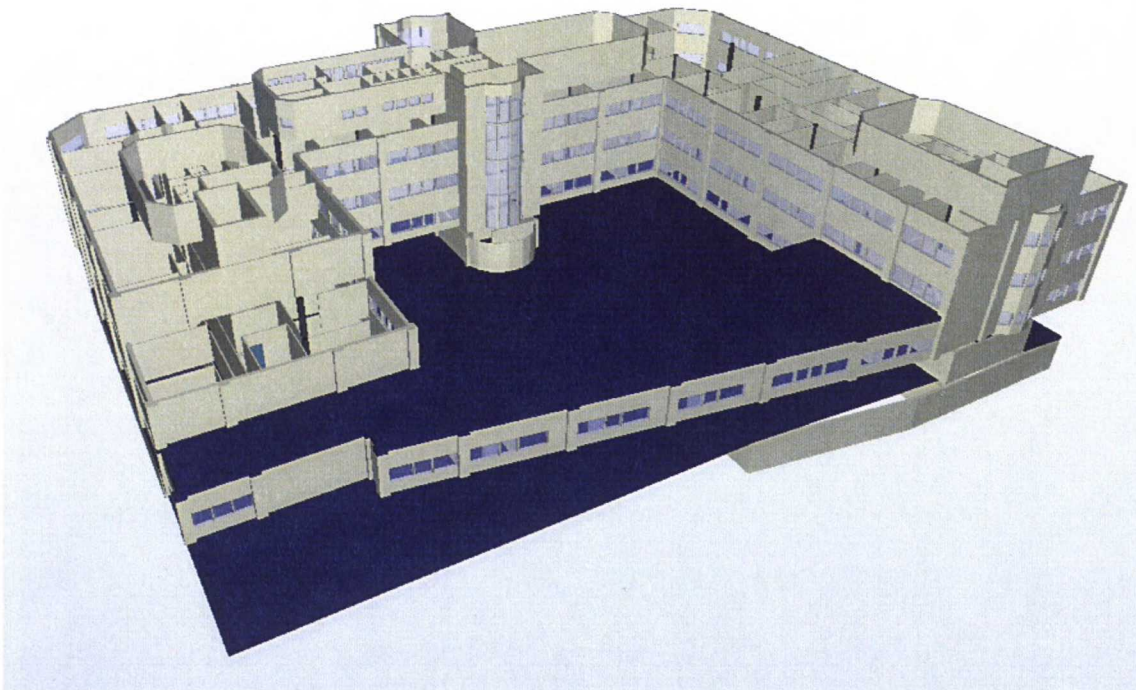
#	Laskentatapaus
1	Referenssitapaus, SRMK 2013 mukaiset järjestelmät
2	Rakenteelliset parannukset
3	Valaistustehon pienentäminen
4	Tarpeenmukainen ilmanvaihto
5	Useita parannuksia energiatehokkuuteen
6	Maalämmön ja -kylmän käyttö

7.1 Rakennuksen lähtötiedot

Tarkasteltavana rakennuksena toimii Granlund Oy:n pääkonttori, joka sijaitsee Helsingin Malmilla. Rakennus valmistui vuonna 1991. Laskennoissa rakennusta kuitenkin tarkastellaan kuin se olisi suunnitteilla oleva uudisrakennus, jotta rakennukselle voidaan luontevasti laskea koko elinkaaren hiilijalanjälki. Rakennuksen rakenteet ja järjestelmät päivitetään laskennoissa myös vastaamaan tällä hetkellä voimassaolevia määräyksiä.

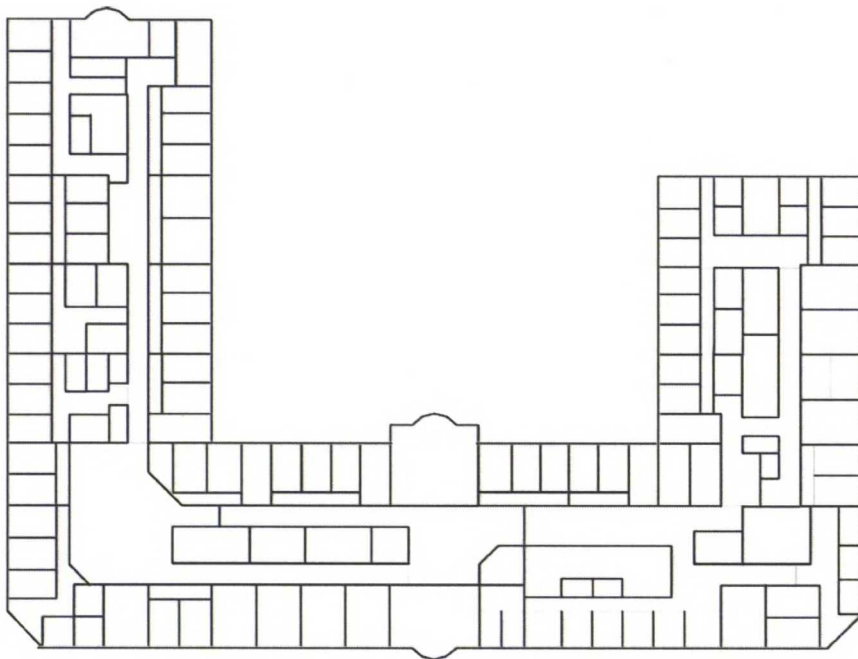
7.1.1 Geometria

Rakennuksen geometriamalli on luotu Magi Room ohjelmalla. Rakennuksessa on 4 kerrosta, minkä lisäksi alapuolella on kellaritilat sekä parkkihalli. Kyseinen parkkihalli ei kuitenkaan ole mukana laskelmissa. Ensimmäisen kerroksen ja parkkihallin välissä on myös pysäköintitaso, minkä vuoksi ensimmäisen kerroksen alapohja on ulkoilmaan rajoittuva. Rakennuksen bruttoala on 9700 m².



Kuva 17 Rakennuksen 3D-malli

Kerrokset 1.-3. ovat tilankäytöltään melko tyypillisiä toimistorakennuksen kerroksia. Suurimman osan pohjapinta-alasta vievät toimistohuoneet, minkä lisäksi kerroksissa on mm. neuvottelu- sekä sosiaalitiloja. Neljäs kerros (ullakko) koostuu pääosin sauna- ja neuvottelutiloista.



Kuva 18 Toisen kerroksen pohjapiirustus

7.1.2 Perustukset

Rakennuksesta noin yksi kolmasosa on perustettu kallion päälle ja noin kaksi kolmasosaa paaluanturoille. Paalujen koko on paalusta riippuen 25x25 cm tai 30x30 cm. Paalujen lyöntisyvyys on keskimäärin 10 metriä. Lisäksi perustuksiin on luettu kuuluvaksi ne osat seinistä, jotka ovat maan sisällä. Anturoiden ja paalujen hiilijalanjälkeä laskettaessa on huomioitu betonin lisäksi myös niiden sisältämät keskimääräiset raudoitukset.

7.1.3 Säätiedot

Tarkasteltava rakennus sijaitsee Helsingissä. Energialaskelmissa on käytetty Ilmatieteen laitoksen testivuoden 1979 säätiä. Käytetty säädata perustuu siis Helsinki-Vantaan säähavaintoaseman mittauksiin kyseiseltä vuodelta.

7.1.4 Veden kulutus

Laskelmissa käytetty veden kulutus perustuu todellisiin mittauksiin olemassa olevan rakennuksen veden kulutuksesta. Mittausajanjakso on lokakuu 2010–syyskuu 2012 (2 vuotta). Näillä mittauksilla saadaan rakennuksen keskimääräiseksi veden kulutukseksi 1740 m³/vuosi. Energialaskelmissa käytetty lämpimän käyttöveden kulutus perustuu vastaaviin tietoihin. Lämpimän käyttöveden kulutus on 515,5 m³/vuosi. Laskelmissa käytetty kylmän ja lämpimän veden lämpötilaero on 50 K.

7.2 Laskennan suorittaminen

Hiilijalanjäljen laskenta noudattaa pääosin luvussa 6 kuvattua laskentamenetelmää. Yksinkertaistuksia käytetään niiltä osin, kun tietoa ei ole saatavilla. Rakennuksen käyttöiäksi oletetaan 50 vuotta. Seuraavaksi käydään läpi, miten kunkin moduulin päästöt lasketaan.

Moduulit A1-A4 (tuotevaihe sekä kuljetukset) lasketaan VTT:n ILMARI laskentatyökätlä. ILMARI on VTT:n yhteistyössä Pöyryn kanssa kehittämä uudisrakentamiseen ja peruskorjauksiin soveltuva laskuri rakennusmateriaalien aiheuttaman hiilijalanjäljen laskemiseen. Laskuri huomioi kasvihuonekaasupäästöiltään merkittävimmät rakennusosat, kuten perustukset, rakennusrungon, julkisivun, seinät, päällysteet ja piharakenteet. Tässä tapauksessa piharakenteet on kuitenkin jätetty vähämerkityksisinä huomioimatta. Laskuri ei siis huomioi talotekniikkaa. Mukaan lasketaan materiaalien valmistus, kuljetukset, materiaalihukka työmaalla sekä tuotteiden mahdollinen uusiminen käyttöiän aikana. Laskuri toimii niin, että ohjelmaan määritetään rakennetyypit, jolloin laskuri kertoo rakennetyypin hiilidioksidipäästöt pinta-alaa tai tilavuutta kohti. Kokonaishiilijalanjälki saadaan lataamalla ohjelmaan excel-muodossa oleva määräluettelo, joka sisältää kunkin rakennetyypin pinta-alan tai tilavuuden. Rakennusmateriaalien kasvihuonekaasupäästöistä huomioon on otettu hiilidioksidi-, metaani ja typpioksiduulipäästöt seuraavilla kertoimilla:

- CO₂ 1
- CH₄ 25
- N₂O 298

Rakennustuotteiden valmistuksen hiilijalanjäljet perustuvat ensisijaisesti RT-ympäristöselosteisiin. Siltä osin, kun näitä selosteita ei ole olemassa, niin arviot perustuvat pääosin julkiseen tietoon, joka on peräisin erilaisista luotettavista tietokannoista.

Lisäksi muutamien tuotteiden kohdalla tieto perustuu suomalaiselle valmistajalle aikaisemmin VTT:n toimesta laadittuun elinkaariarvioon. Kuljetuksien hiilijalanjälkiarviot perustuvat VTT:n LIPASTO-tietokantaan. (Häkkinen 2011)

Moduulissa A5 (työmaatoiminnot) käytetään yksinkertaistusta 200 kWh/brm². Energiamuodoksi oletetaan sähkö. Yksinkertaistusta käytetään, koska työmaatoimintojen energiankulutuksesta on vaikea löytää luotettavaa tietoa.

Suorat kasvihuonekaasupäästöt (moduuli B1) jätetään huomioimatta. Näiden voidaan olettaa olevan kokonaisuuden kannalta merkityksettömiä, vaikka kylmäaineita käytetäänkin jonkin verran rakennuksen jäähdytyksessä.

Myös moduulissa B2 (kunnossapito) käytetään esitettyä yksinkertaistusta 2 kg CO₂/brm²/vuosi. Tätä yksinkertaistusta käytetään, koska ”uuden” rakennuksen todellista huolto-ohjelmaa ei tunneta.

Moduulit B3-B5 (korjaus, osien vaihto sekä laajamittaiset korjaukset) jätetään huomioimatta. Korjaustarve ja osien vaihto jätetään huomioimatta, sillä näitä on tässä tapauksessa hankala ennakoida. Voidaan lisäksi olettaa, että rakennus ei tarvitse peruskorjausta 50 vuoden tarkastelujakson aikana.

Energiankäyttö (moduuli B6) lasketaan Granlund Oy:n kehittämällä RIUSKA ohjelmalla. RIUSKA on dynaaminen energialaskentaohjelma, joka ottaa huomioon rakenteiden lämpökapasiteetit. Laskenta tapahtuu tuntitasolla. RIUSKA käyttää laskennan perustana siihen syötettyä rakennuksen tietomallia. Ohjelmaan määritetään mm. rakennuksen rakenteet, ikkunat sekä varjostusratkaisut, sisäiset kuormat, ulkoiset sääolosuhteet, ilmanvaihdon sähkönkulutus ja LTO:n hyötysuhde. Energiankulutuksen lisäksi RIUSKA laskee tuntitasolla tilojen lämpötilat sekä niiden pysyvyyden. Ohjelma huomioi myös lämmön kehitys- ja siirtohäviöt. Sähkön käytön osalta huomioidaan vain kiinteistösähkö. Kiinteistösähköksi luetaan valaistuksen, lvi-laitteiden, hissien, autolämmityspistorasioiden sekä sulanapitolämmityksen sähkönkulutus. Mukaan ei lasketa siis esimerkiksi toimistolaitteiden ja keittölaitteiden sähkönkulutusta.

Suomen keskiarvosähkön päästötasona pidetään laskennassa 0,273 kg CO₂ ekv/kWh (Green Building Council Finland 2013b). Kaukolämmölle käytetään Suomessa vuosien 2000–2008 aikana tuotetun kaukolämmön keskimääräistä päästökerrointa 0,216 kg CO₂ ekv/kWh (Keto 2010, s. 4). Kaukolämmön yhteistuotannon energianlähteet on kertoimessa jaettu hyödynjakomenetelmällä.

Veden kulutuksen osalta (moduuli B7) käytetään HSY:n (Helsingin seudun ympäristöpalvelut 2011 & 2012) alueen keskimääräiseen vuotuisen kokonaisvedenkulutukseen (n. 70 milj. m³) ja vuoden 2011 vesihuollon aiheuttamiin kasvihuonekaasupäästöihin (85 638 tn CO₂ ekv) perustuvaa kerrointa. Näillä luvuilla laskettuna saadaan kulutetun veden päästökertoimeksi 1,22 kg CO₂ ekv/m³. Tässä kohdassa käytetään yksinkertaistusta, jossa huomioidaan kaikki vedenkäyttö rakennuksessa. Kuluttajalaitteiden vedenkulutusta ei siis vähennetä kokonaiskulutuksesta.

Purkamissa (moduulit C1-C4) käytetään oletusarvoa 20 kg CO₂/brm³. Oletusarvoa käytetään, koska käytettyjen rakennustuotteiden jatkokäyttöä ei tunneta.

7.3 Referenssitapaus (tapaus 1)

Referenssitapauksen rakennus täyttää tämänhetkisen SRMK:n asettamat vaatimukset. Tapausta käytetään vertailupohjana kaikille muille laskentatapauksille. Seuraavaksi kuvataan referenssitapauksen rakennuksen tärkeimmät ominaisuudet elinkaaren hiilijalanjäljen kannalta. Tätä seuraavissa laskentatapauksissa nämä ominaisuudet ovat samat siltä osin, kun ei toisin mainita.

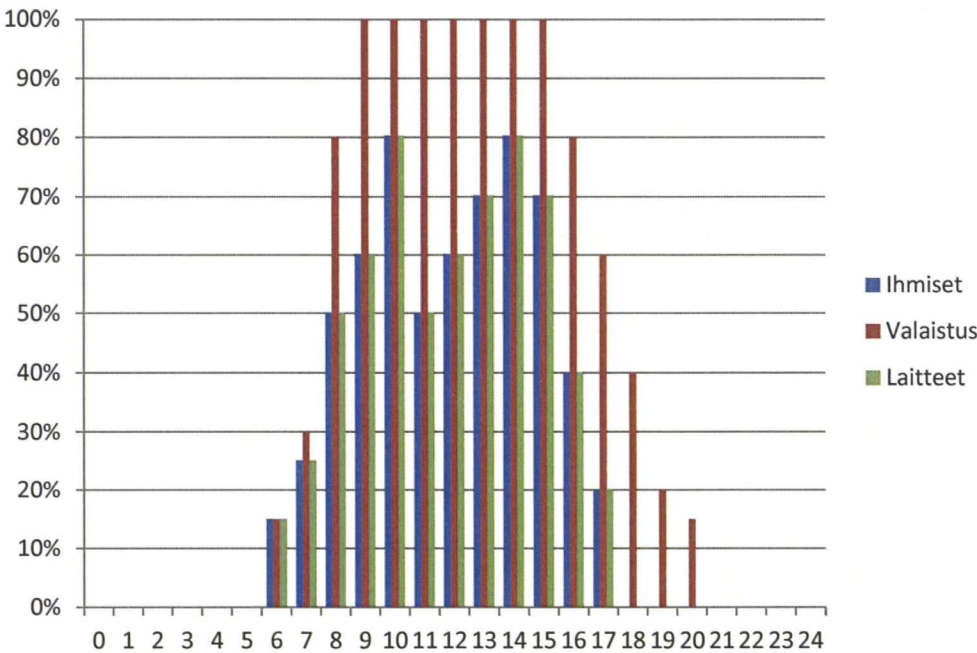
7.3.1 Sisäiset lämpökuormat

Valaistusteho on tarkasteltavasta huoneesta riippuen 10–20 W/m². Toimistotiloissa tämä arvo on 15 W/m². Yhdestä työntekijästä oletetaan aiheutuvan 125 W lämpökuorma. Jokaisella työntekijällä oletetaan myös olevan käytössään pöytätietokone, josta aiheutuu 150 W lämpökuorma. Toimistojen ja kokoustilojen henkilömäärät laskennassa vastaavat pääosin huoneille mitoitettuja todellisia käyttäjämääriä. Jos tätä tietoa ei ole huoneen osalta käytettävissä, laskennoissa on käytetty standardiarvoja (kts. Taulukko 7)

Taulukko 7 Tilatyypikohtaiset standardikäytön lämpökuormat ja käyttöajat referenssitapauksessa

	Ihmiset		Valaistus		Laitteet	
	kpl/m2	klo	W/m2	klo	W/hlö	klo
Toimistohuoneet	0,1	6-18	15	6-21	150	6-18
Kokoustilat	0,1 /0,3	6-18	15	6-21	useita	6-18
WC-tilat	0,1	8-17	10	8-17	-	-

Huoneiden todellinen kuormitus vaihtelee tunneittain käytetyn kuormitusprofiilin mukaan (kts. Kuva 19). Esimerkiksi toimistohuoneiden henkilökuormitus on keskimäärin 61 % mitoitus- tai standardiarvosta.



Kuva 19 Toimistohuoneiden suhteellinen lämpökuormitus kellonajan funktiona

7.3.2 Rakennuksen vaippa

Rakenteiden U-arvot ovat SRMK D3:ssa (2013) esiintyvien vertailuarvojen mukaisia. Rakenteet ovat peräisin (pl. ulkoilmaan rajoittuva alapohja) Rakennustieto Oy:n RT-korteista. Alla olevassa taulukossa on esitetty rakenteiden tärkeimmät ominaisuudet hiilijalanjäljen laskennan kannalta. Taulukossa on esitetty myös rakenteiden kirjalliset lähteet.

Taulukko 8 Rakenteiden tärkeimmät ominaisuudet referenssitapauksessa

Rakennusosa	U-arvo W/m ² K	Tärkeimmät kerrokset ja niiden paksuus	Lähde
Ulkoseinä	0,17	Tiilimuuraus 130 mm Lasivillaeriste 200 mm Betonikuori 100 mm	RT 82-11006, s. 5
Yläpohja	0,09	Teräsbetoni-laatta 40 mm Kevytsoraeriste 750 mm Polystyreenieriste 100 mm Ontelolaatta 320 mm Kipsilevy 12,5 mm	RT 83-11010, s. 6
Alapohja, maanvarainen	0,16	Betoni K35 100 mm Polystyreenieriste 100 mm Salaojituseros 300 mm Perusmaa	RT 83-11009, s. 20
Alapohja, ulkoilmaan rajoittuva	0,09	Lattiatbetoni 75 mm Ontelolaatta 320 mm Polystyreenieriste 410 mm	RIUSKA laskentaohjelma
Välipohja	-	Lattiatbetoni 60 mm Ontelolaatta 320 mm Kipsilevy 12,5 mm	RT 83-10902, s. 4
Väliseinä	-	Kipsilevy 12,5 mm Lasivillaeriste 100 mm Teräsranka 42 mm Kipsilevy 12,5 mm	(Gyproc 2011)
Kantava seinä	-	Kipsilevy 12,5 mm Teräsbetoni 100 mm Kipsilevy 12,5 mm	RT 82-10903, s. 4

Ilmanvuotoluku q_{50} laskennassa on $4 \text{ m}^3/\text{h m}^2$. Tämä tarkoittaa sitä, että vuotoilma 50 Pa:n paine-erolla on $4 \text{ m}^3/\text{h}$ yhtä ulkovaipan neliömetriä kohden.

Laskennoissa käytetään tavallisia kolmilasisia argontäytteisiä ikkunoita. Ikkunoiden U-arvo (ml. karmit) on $1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Näkyvän valon läpäisy on 59,9 % ja auringonvalon kokonaisläpäisy 34,1 %.

7.3.3 Ilmanvaihto

Rakennuksessa on vakioilmavirtainen ilmanvaihto. Toimisto- ja neuvottelutilojen keskimääräiset ilmamäärät ovat $1,85 \text{ dm}^3/\text{s m}^2$. Ilmanvaihdon SFP-luku on $2 \text{ kW/m}^3/\text{s}$.

Toimistotiloja palvelevien koneiden LTO on toteutettu regeneratiivisesti (pyörivä kiekko). Regeneratiivisen LTO:n vuosihyötysuhteen oletetaan laskennassa olevan 75 %. WC-tiloja ja saunaosastoa palvelevissa koneissa LTO taas on toteutettu levylämmönsiirtimellä johtuen tilojen päästöistä ja kosteudesta. Levylämmönsiirtimien vuosihyötysuhde laskennassa on 60 %. Portaissa ja hisseissä sen sijaan on ainoastaan koneellinen poisto. Tämän vuoksi näissä tiloissa ei ole LTO:ta lainkaan (LTO:n hyötysuhde 0 %).

7.3.4 Lämmitys

Rakennuksen lämmitystarve katetaan kokonaisuudessaan kaukolämmöllä. Tämä pitää sisällään tilojen, ilmanvaihdon sekä lämpimän käyttöveden lämmitystarpeen. Tuloilman lämpötilan asetusarvo lämmityskaudella on 19 °C. Lämpimän käyttöveden kohdalla ei erotella kuluttajalaitteiden vedenkäyttöä kiinteistön veden käytöstä, vaan laskennassa huomioidaan lämpimän käyttöveden kulutus kokonaisuudessaan. Toimistotilojen lämmitys aloitetaan, kun lämpötila laskee 21 °C:een.

7.3.5 Jäähdytys

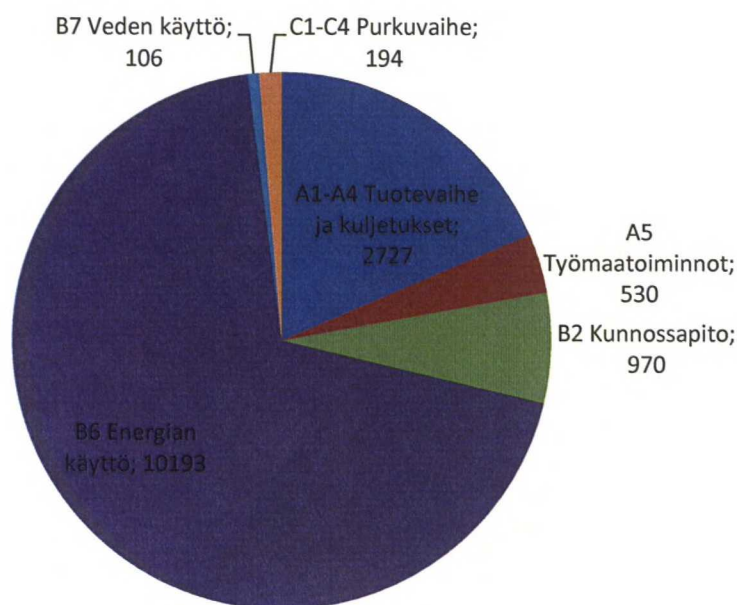
Jäähdytysenergia tuotetaan kiinteistössä vedenjäähdytyskoneella. Rakennuksessa on vesikiertoinen jäähdytysjärjestelmä. Jäähdytettävissä tiloissa on passiiviset jäähdytyspalkit. Myös tuloilmaa jäähdytetään ilmanvaihtokoneissa olevien jäähdytyspatterien avulla. Tuloilman lämpötilan asetusarvo jäähdytyskaudella on 17 °C.

Vapaajäähdytystä ei käytetä. Kylmäntuottolaitteen todellista valmistajaa ja mallia ei tunneta. Tämän vuoksi vuosikylmäkertoimelle käytetään laskennassa arvoa 3. SRMK D5 antaa mahdollisuuden käyttää tätä arvoa silloin, kun laitteen todellinen kylmäkerroin ei ole käytettävissä (Ympäristöministeriö 2007b, s. 15).

Toimistotilojen jäähdytys aloitetaan, kun lämpötila kohoaa 27 °C:een.

7.3.6 Tulokset

Referenssitapauksen elinkaaren hiilijalanjälki on **14 720 tn CO₂ ekv**. Bruttoneliömetriä ja käyttövuotta kohden luku on 30,4 kg CO₂ ekv/brm²/vuosi. Alla olevassa kuvassa on esitetty kokonaishiilijalanjäljen jakautuminen eri moduulien kesken. On huomioitava, että moduuleja B1, B3-B5 ei ole huomioitu laskennoissa lainkaan.



Kuva 20 Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen muodostuminen referenssitapauksessa (tn CO₂ ekv)

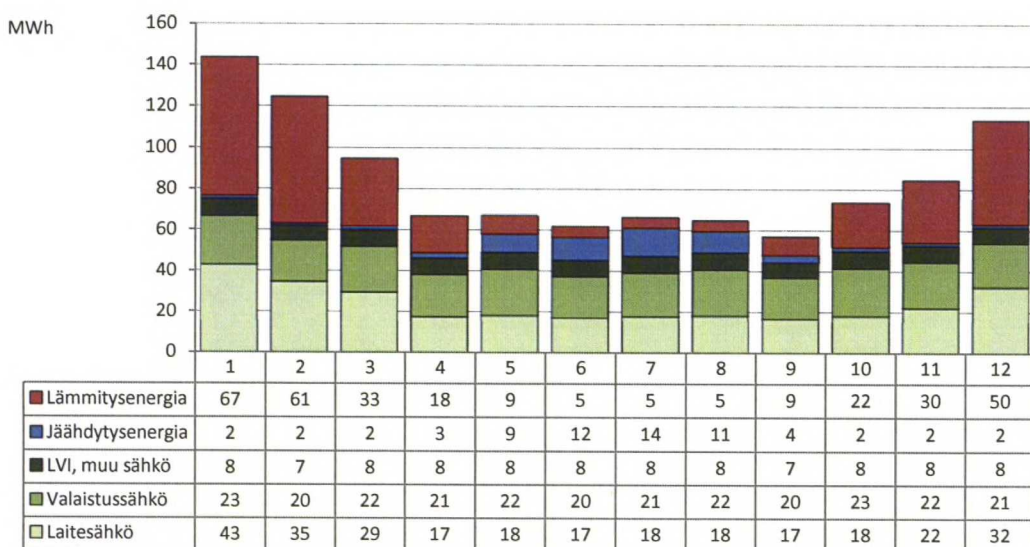
Energian käytön osuus kokonaishiilijalanjäljestä on 69,2 %. Toiseksi suurimman osuuden muodostaa rakennusmateriaalien valmistus ja kuljetukset rakennustyömaalle. Tämän osa-alueen osuus on 18,5 %. Seuraavaksi käsitellään rakennuksen energiankulutusta tarkemmin.

Rakennuksen vuotuinen ostoenergiankulutus on **812,4 MWh** (pl. kuluttajalaitteiden sähkön kulutus). Alla olevassa taulukossa on esitetty vuotuinen ostoenergiankulutus sekä energian käytön hiilijalanjäljet lajeittain. Laitesähkö pitää sisällään lvi-laitteiden, autolämmityksen, hissien ja sulanapidon sähkönkulutuksen.

Taulukko 9 Vuotuinen ostoenergiankulutus lajeittain ja sen aiheuttama vuotuinen hiilijalanjälki referenssitapauksessa

	Energiamuoto	Ostoenergiankulutus (MWh/a)	Hiilijalanjälki (tn CO ₂ /a)
Lämmitys	Kaukolämpö	314,3	67,9
Jäähdytys	Sähkö	64,2	17,5
Laitesähkö	Sähkö	173,8	47,4
Valaistus	Sähkö	260,1	71,0
Yhteensä		812,4	203,9

Alla olevassa kuvaajassa on vielä esitetty ostoenergiankulutus kalenterikuukausittain. On huomioitava, että kyseisessä kuvaajassa on mukana myös käyttäjänsähkö, jota ei lasketa mukaan rakennuksen hiilijalanjälkeen.



Kuva 21 Rakennuksen ostoenergiankulutus kalenterikuukausittain referenssitapauksessa. Huom. sisältää myös käyttäjäsjähkön.

7.4 Rakenteelliset parannukset (tapaus 2)

Tässä laskentatapauksessa rakennuksen rakenteisiin ja ikkunoihin tehdään parannuksia. Ulkoseinien ja maanvaraisen alapohjan U-arvoja on parannettu 20 %. U-arvojen parannus on saavutettu yksinkertaisesti kasvattamalla lämpöeristeen paksuutta rakenteissa. Alla olevassa taulukossa on esitetty tähän laskentatapaukseen muutetut rakenteet.

Taulukko 10 Muuttuneiden rakenteiden ominaisuudet

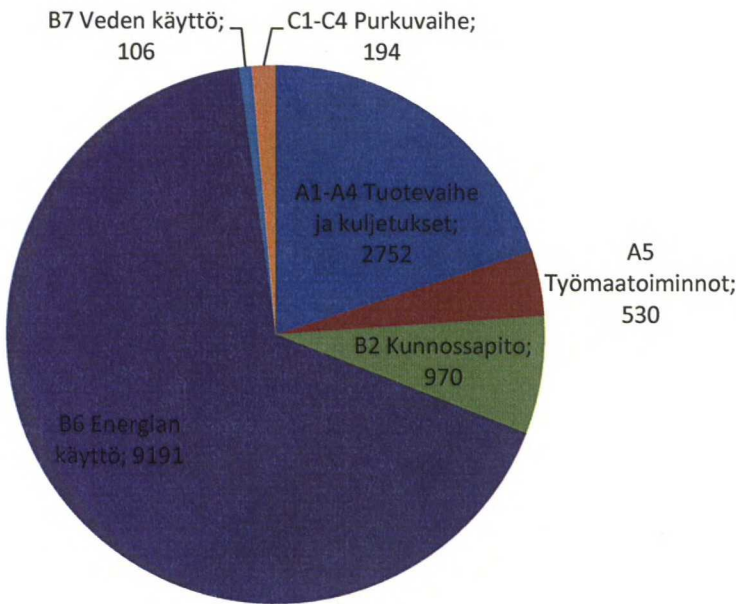
Rakennusosa	U-arvo W/m ² K	Tärkeimmät kerrokset ja niiden paksuus	Lähde
Ulkoseinä	0,136	Tiilimuuraus 130 mm Lasivillaeriste 247 mm Betonikuori 100 mm	RT 82-11006, s. 5
Alapohja, maanvarainen	0,128	Betoni K35 100 mm Polystyreenieriste 156 mm Salaojituseros 300 mm Perusmaa	RT 83-11009, s. 20

Myös rakenteiden ilmatiiveyttä on parannettu. Ilmatiiveyden parantuminen oletetaan saavutettavan kiinnittämällä asiaan enemmän huomioita rakennusvaiheessa, ilman lisääntynyttä rakennusmateriaalien käyttöä. Tässä laskentatapauksessa ilmavuotoluku q_{50} on $2 \text{ m}^3/\text{h m}^2$, siis puolet referenssitapauksen luvusta.

Edellä olevien parannusten lisäksi käytetään paremmalla U-arvolla varustettuja ikkunoita. Ikkunoiden U-arvo on nyt 20 % parempi kuin referenssitapauksessa, siis $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$. Myös tässä tapauksessa käytettävät ikkunat ovat kolmilasisia ja argontäytteisiä. Kolmas lasi on kuitenkin näissä ikkunoissa yli tuplasti paksumpi kuin referenssitapauksen ikkunoissa. Kolmannen lasin paksuus on nyt 8,8 mm, kun referenssitapauksen ikkunoissa se oli vain 4 mm. Näkyvän valon läpäisy tämän laskentatapauksen ikkunoissa on 61,1 % ja auringonvalon kokonaisläpäisy 34 %.

Tulokset

Rakenteellisilla parannuksilla rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki on **13 743 tn CO₂ ekv.** Bruttoneliömetriä ja käyttövuotta kohden luku on 28,3 kg CO₂ ekv/brm²/vuosi. Hiilijalanjälki on **6,6 %** pienempi kuin referenssitapauksessa.



Kuva 22 Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen muodostuminen rakenteellisilla parannuksilla (tn CO₂ ekv)

Energian osuus hiilijalanjäljestä on nyt 66,9 %. Tuotevaiheen sekä kuljetusten osuus on 20,0 %. Energian osuus on siis hieman laskenut, kun energiankulutus on pienentynyt referenssitapaukseen verrattuna.

Ulkoseinien ja maanvaraisen alapohjan eristepaksuuden kasvattaminen sekä eristävyydeltään parempien ikkunoiden käyttäminen kasvatti rakennusvaiheen hiilijalanjälkeä 0,9 %.

Vuotuinen ostoenergiankulutus on nyt **717,8 MWh**, siis 11,6 % matalampi kuin referenssitapauksessa.

Taulukko 11 Vuotuinen ostoenergiankulutus lajeittain rakenteellisilla parannuksilla ja sen muutos verrattuna referenssitapaukseen

	Energiamuoto	Ostoenergiantarve (MWh/a)	Muutos
Lämmitys	Kaukolämpö	213,1	-32,2 %
Jäähdytys	Sähkö	70,8	10,3 %
Laitesähkö	Sähkö	173,8	0,0 %
Valaistus	Sähkö	260,1	0,0 %
Yhteensä		717,8	-11,6 %

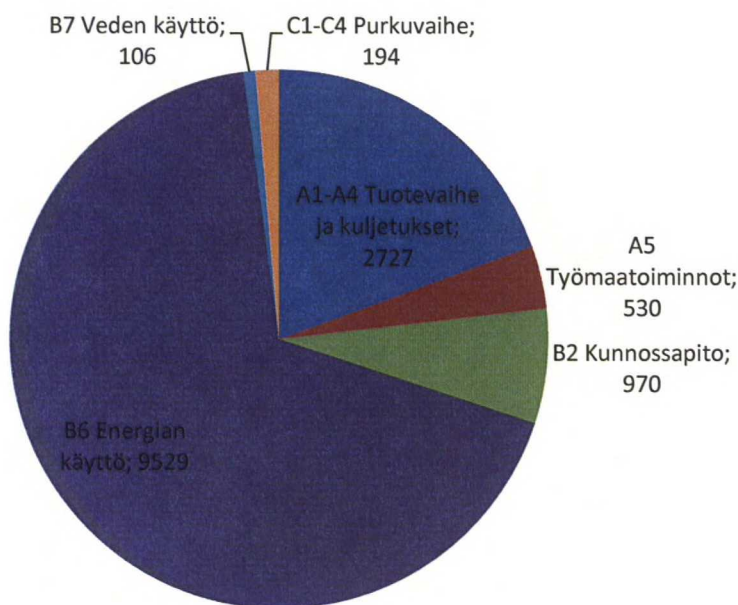
Taulukosta nähdään, että rakenteelliset parannukset vähensivät merkittävästi lämmitysenergian kulutusta. Rakennuksen eristäminen kuitenkin kasvatti jonkin verran jäähdytysenergian kulutusta. Tähän vaikuttaa tilojen lämpökuormat. Lämpökuormien vuoksi jäähdytystä tarvitaan jo ulkoilman ollessa reilusti jäähdytyksen asetusarvon (23 °C) alapuolella. Tässä tilanteessa eristeet vähentävät lämpövirtaa sisältä ulos ja näin nostavat rakennuksen jäähdytystarvetta.

7.5 Valaistustehon pienentäminen (tapaus 3)

Tässä laskentatapauksessa vähennetään rakennuksen keskimääräistä valaistustehoa valaistuksen energiankulutuksen pienentämiseksi. Toimistotilojen valaistusteho on tässä tapauksessa vain 10 W/m² (vrt. referenssitapauksessa 15 W/m²). Vähennys voidaan saavuttaa esimerkiksi käyttämällä tehokkaampia lamppeja tai erottamalla ympäristön valaistus ja paikallinen työpistevalaistus toisistaan (kts. kohta 5.4).

Tulokset

Valaistustehon pienentämisellä rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki on **14 056 tn CO₂ ekv.** Bruttoneliömetriä ja käyttövuotta kohden luku on 29,0 kg CO₂ ekv/brm²/vuosi. Tulos on **4,5 %** pienempi kuin referenssitapauksessa.



Kuva 23 Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen muodostuminen valaistustehon pienentämisellä (tn CO₂ ekv)

Energian osuus on nyt 67,8 % ja tuotevaiheen sekä kuljetusten osuus 19,4 %.

Vuotuinen ostoenergiankulutus on **769,9 MWh**, joka on 5,2 % pienempi kuin referenssitapauksessa.

Taulukko 12 Vuotuinen ostoenergiankulutus lajeittain valaistustehon pienentämisellä ja sen muutos verrattuna referenssitapaukseen

	Energiamuoto	Ostoenergiantarve (MWh/a)	Muutos
Lämmitys	Kaukolämpö	343,8	9,4 %
Jäähdytys	Sähkö	56,1	-12,6 %
Laitesähkö	Sähkö	173,8	0,0 %
Valaistus	Sähkö	196,2	-24,6 %
Yhteensä		769,9	-5,2 %

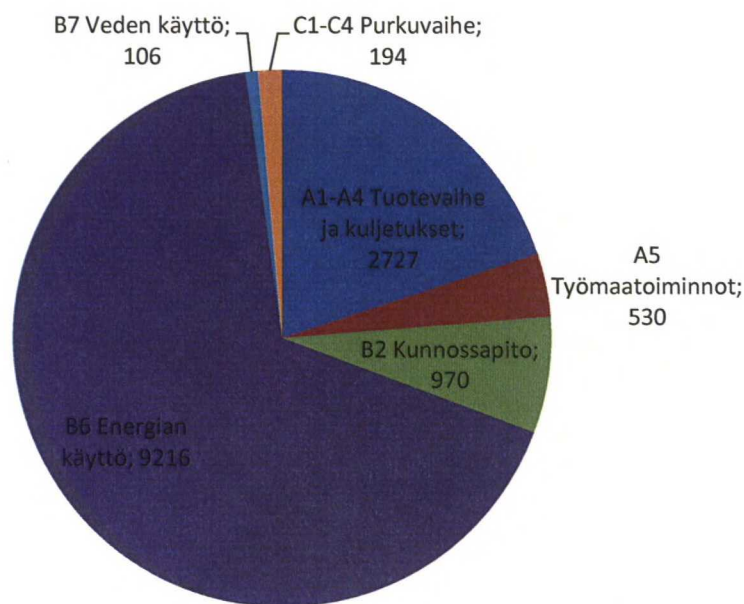
Taulukosta nähdään, että valaistustehon pienentäminen vähensi valaistuksen energiankulutuksen lisäksi myös jäähdytyksen energiankulutusta. Tämä johtuu valaistuksen aiheuttamien lämpökuormien pienentymisestä. Samasta syystä lämmitysenergian kulutus kuitenkin kasvoi 9,4 % referenssitapaukseen verrattuna, kun ilmaisenergian määrä lämmityskaudella väheni.

7.6 Tarpeenmukainen ilmanvaihto (tapaus 4)

Tarpeenmukaista ilmanvaihtoa käyttämällä arvioidaan, että rakennuksen keskimääräiset ilmamäärät saadaan pudotettua lähes puoleen. Toimisto- ja neuvottelutilojen keskimääräiset ilmamäärät ovat tässä tapauksessa 0,98 dm³/s/m² eli 47 % matalammat kuin referenssitapauksessa. Tarpeenmukainen ilmanvaihto voidaan toteuttaa esimerkiksi kohdassa 5.2.2 kuvatulla CO₂-mittaukseen perustuvalla menetelmällä. Ilmamääriä oletetaan säädettyvän siis tässä tapauksessa mittausten avulla arvioidun henkilömäärän perusteella. Tilojen jäähdytys hoidetaan edelleenkin passiivisilla jäähdytyspalkeilla.

Tulokset

Tarpeenmukaista ilmanvaihtoa käyttäen rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki on **13 743 tn CO₂ ekv.** Bruttoneliömetriä ja käyttövuotta kohden luku on 28,3 kg CO₂ ekv/brm²/vuosi. Tulos on **6,6 %** pienempi kuin referenssitapauksessa.



Kuva 24 Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen muodostuminen tarpeenmukaista ilmanvaihtoa käyttäen (tn CO₂ ekv)

Energian osuus on nyt 67,1 % ja tuotevaiheen sekä kuljetusten osuus 19,8 %.

Vuotuinen ostoenergiankulutus on nyt **728,4 MWh**, siis 10,3 % matalampi kuin referenssitapauksessa.

Taulukko 13 Vuotuinen ostoenergiankulutus lajeittain tarpeenmukaista ilmanvaihtoa käyttäen ja sen muutos verrattuna referenssitapaukseen

	Energiamuoto	Ostoenergiantarve (MWh/a)	Muutos
Lämmitys	Kaukolämpö	254,9	-18,9 %
Jäähdytys	Sähkö	72,1	12,3 %
Laitesähkö	Sähkö	141,3	-18,7 %
Valaistus	Sähkö	260,1	0,0 %
Yhteensä		728,4	-10,3 %

Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon käyttäminen vähensi luonnollisesti puhallinsähkön kulutusta, mikä näkyy taulukossa pienentyneenä laitesähkön kulutuksena. Lisäksi lämmitysenergian kulutus väheni johtuen pienentyneestä ilmanvaihdon lämmitysenergian kulutuksesta. Jäähdytysenergian kulutus kuitenkin kasvoi. Tämä johtuu siitä, että ilmanvaihdon jäähdyttävä vaikutus oli heikompi pienempien ilmamäärien vuoksi.

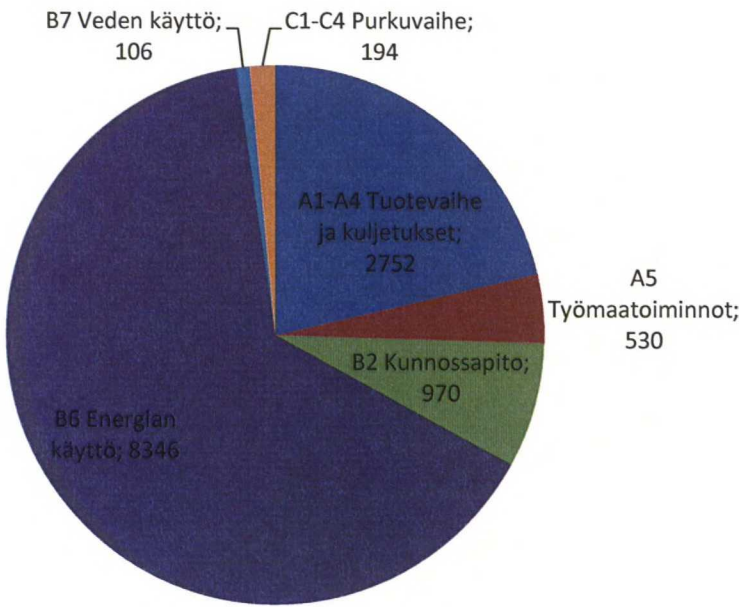
7.7 Useita parannuksia energiatehokkuuteen (tapaus 5)

Tässä laskentatapauksessa on mukana aikaisemmista tapauksista rakenteelliset parannukset sekä valaistustehon pienentäminen. Nämä parannukset ovat toteutettu täysin samalla tavalla kuin aikaisemmissa tapauksissa. Lisäksi ilmanvaihdon tehokkuutta on parannettu pienentämällä rakennuksen SFP-lukua. SFP-luku on nyt 10 % pienempi, 1,8 kW/m³/s. SFP-lukua voidaan pienentää esimerkiksi käyttämällä tehokkaampia pu-

haltimia tai suunnittelemalla ilmanvaihtokanavat väljemmiksi. Ilmanvaihdon tehokkuutta on parannettu myös käyttämällä portaiden ja hissien ilmanvaihtoon tulo- ja poistokonetta lämmöntalteenotolla (hyötysuhde 75 %). Referenssitapauksessa näissä tiloissa oli ainoastaan koneellinen poisto ilman lämmöntalteenottoa.

Tulokset

Tässä laskentatapauksessa rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki on **12 898 tn CO₂ ekv.** Bruttoneliömetriä ja käyttövuotta kohden luku on 26,6 kg CO₂ ekv/brm²/vuosi. Tulos on 12,4 % pienempi kuin referenssitapauksessa.



Kuva 25 Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen muodostuminen, useita parannuksia (tn CO₂ ekv)

Energian osuus on nyt 64,7 % ja tuotevaiheen sekä kuljetusten 21,3 %.

Vuotuinen ostoenergiankulutus on nyt **660,5 MWh**, siis 18,7 % matalampi kuin referenssitapauksessa.

Taulukko 14 Vuotuinen ostoenergiankulutus lajeittain useita parannuksia käyttäen ja sen muutos verrattuna referenssitapaukseen

	Energiamuoto	Ostoenergiantarve (MWh/a)	Muutos
Lämmitys	Kaukolämpö	235,2	-25,2 %
Jäähdytys	Sähkö	60,6	-5,6 %
Laitesähkö	Sähkö	168,5	-3,0 %
Valaistus	Sähkö	196,2	-24,6 %
Yhteensä		660,5	-18,7 %

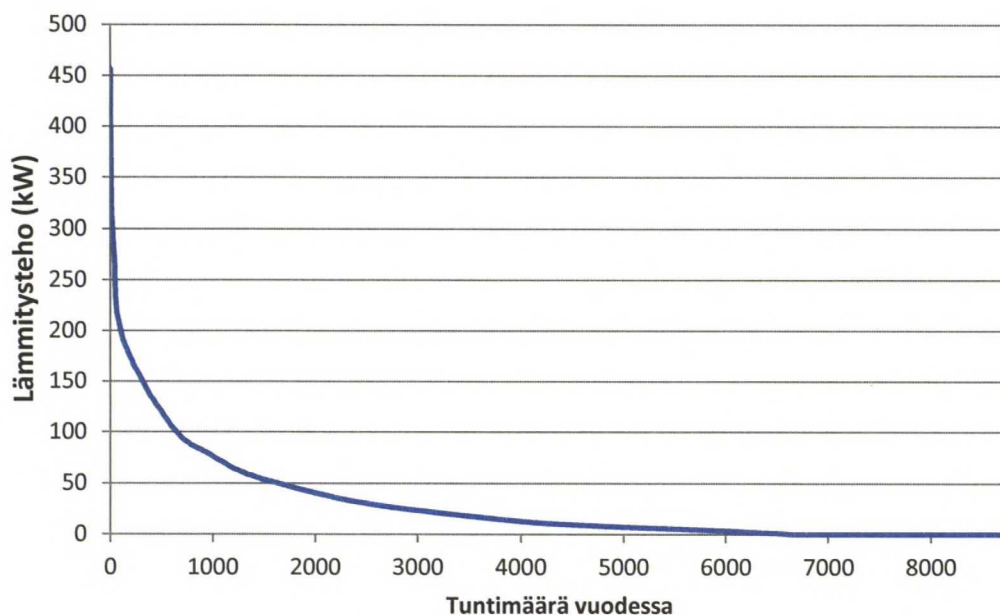
Taulukosta nähdään, että lämmitysenergian sekä valaistussähkön kulutus on pienentynyt merkittävästi referenssitapauksen tilanteesta. Vaikutus jäähdytysenergian sekä kiinteis-
tösähkön kulutukseen on huomattavasti pienempi.

7.8 Maalämpöpumpun käyttö referenssitapauksessa (tapaus 6)

Viimeisessä laskentatapauksessa hyödynnetään maalämpöä ja maakylmää referenssitapauksen rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysenergian tuotannossa. Maalämmön käyttö ei luonnollisesti vaikuta rakennuksen energiantarpeisiin, jotka ovat samat kuin referenssitapauksessa. Maalämmön ja -kylmän käyttö sen sijaan vaikuttaa lämmitys- ja jäähdytysenergiankulutuksen aiheuttamaan hiilijalanjälkeen.

Tässä laskentatapauksessa oletetaan, että rakennus sijaitsee kaukolämpöalueen ulkopuolella. Maalämpöä ei nimittäin yleensä ole rakennuksen hiilijalanjäljen kannalta kannattavaa käyttää silloin, kun rakennus sijaitsee kaukolämpöalueella. Kaukolämpöalueella sijaitsevassa rakennuksessa, jossa käytetään sähköä lämmityksen tuottamiseen (lämpöpumpun kanssa tai suoralla sähkölämmityksellä), tulisi lämmityssähkölle käyttää marginaalisähkön päästökerrointa. Marginaalisähkö tarkoittaa sitä ”ylimääräistä” sähköä, joka joudutaan tuottamaan, kun kaukolämpöalueella käytetään lämmityksen tuottamiseen sähköä. Tätä ylimääräistä sähköä ei voida tuottaa kaukolämmön ja sähkön yhteistuotannolla, sillä yhteistuotantoa säädellään kaukolämmön tarpeen mukaan. Marginaalisähkö on lauhdevoimaa, joten sen päästökerroin on huomattavasti keskiarvosähkön päästökerrointa korkeampi (noin 0,7 kg CO₂ ekv/kWh) (Heljo & Laine 2005, s. 10). Em. syistä maalämpöä ei ole ympäristötehokkuuden kannalta kannattavaa käyttää kaukolämpöalueella.

Johtuen etenkin suurista porauskustannuksista, maalämpöpumppua ei yleensä ole kannattavaa mitoittaa täydelle lämmitysteholle. Sen sijaan käytetään osatehomitoitusta ja tuotetaan jäljelle jäävä teho sähköllä. Maalämpöpumppu (MLP) mitoitetaan yleensä niin, että energiantuotannon kokonaiskustannusten (investointi + energia) nettonykyarvo on mahdollisimman pieni. Myös tässä tapauksessa MLP on mitoitettu näin (kts. Liite 8). Vuoden suurin lämmitystehontarve rakennuksessa on 463,1 kW (sis. tilojen, ilmanvaihdon ja lämpimän käyttöveden lämmitystehon). MLP on tässä tapauksessa kannattavaa mitoittaa 90,9 kW:n teholla. MLP siis kattaa vain 19,6 % rakennuksen lämmityksen huipputehosta. Kyseisellä mitoituksella se kuitenkin tuottaa jopa 88,5 % rakennuksen tarvitsemasta lämmitysenergiasta. Tämä johtuu poikkeuksellisen jyrkästä lämmitystehon pysyvyyskäyrästä suurimpien lämmitystehojen kohdalla (kts. Kuva 26). Lämmitystehon pysyvyyskäyrä kertoo kuinka monta tuntia vuodessa lämmitysteho on yli kuvaa-
jan pysty akselissa ilmoitetun tehon. Korkea huipputeho johtuu suuresta ilmanvaihdon lämmityksen tehontarpeesta aamulla noin seitsemään ja kahdeksan välillä, kun toimistotilojen IV-koneet käynnistyvät ja ulkoilma on vielä kylmää. Todellisuudessa tätä huipputehoa voitaisiin pyrkiä leikkaamaan esimerkiksi porrastamalla IV-koneiden käynnistymisaikoja. Näin voitaisiin leikata sähkölämmityksen korkeaa liittymistehoa. Tätä vaihtoehtoa ei kuitenkaan tutkita tässä työssä.



Kuva 26 Lämmitystehon pysyvyyskäyrä. Huom. Ei sisällä käyttöveden lämmitystehoa.

Käyttövesi lämmitetään MLP:lla 5 °C:sta 40 °C:een. Loput (40–55 °C) lämmitetään sähköllä. Tämä tehdään, koska olisi MLP:n lämpökertoimen kannalta epätaloudellista lämmittää käyttövesi näin korkeaan lämpötilaan pelkällä MLP:lla. Lämpötilan nosto olisi liian korkea.

Rakennuksessa oletetaan tässä tapauksessa käytettävän matalalämpötilaista säteilylämmitystä, kuten lattialämmitystä. Tämä on kannattavaa maalämpöpumpun lämpökertoimen kannalta. Oletetaan, että lattialämmitystä käyttämällä päästään MLP:llä tuotetun lämmitysenergian osalta vuosilämpökertoimeen 3,25 (Motiva 2011).

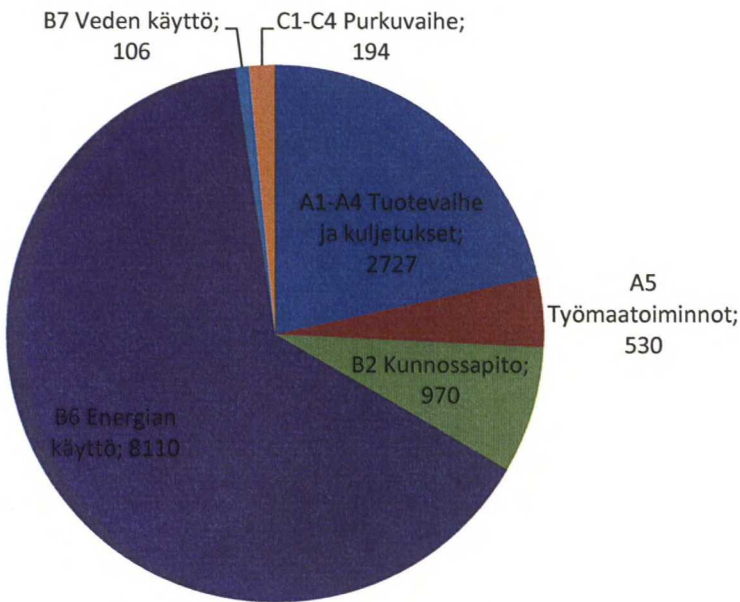
Porakaivoa hyödynnetään myös jäähdytysenergian tuotannossa. Tarvittava jäähdytysteho otetaan ensisijaisesti maakylmänä porakaivosta. Siltä osin kun maasta saatava jäähdytysteho ei riitä, käytetään tavanomaista rakennuksen katolla sijaitsevaa nestejäähdytintä. Porakaivoa voidaan käyttää myös vapaajäähdytykseen, silloin kun maaperän lämpötila on matalampi kuin jäähdytysverkoston menolämpötila. MLP:n matalasta mitoitustehosta johtuen, vapaajäähdytys ei kuitenkaan todennäköisesti riitä kattamaan rakennuksen koko jäähdytystarvetta. Näin oletetaan, että päästään vuosikylmäkertoimeen 5. SRMK D5 antaa mahdollisuuden käyttää tätä arvoa vapaajäähdytyksellä varustetulle kylmäntuottolaitteelle silloin, kun valmistajan ilmoittamaa varmennettua kylmäkerrointa ei ole saatavilla (Ympäristöministeriö 2007b, s. 15).

Maalämpöpumppujärjestelmän valmistuksen aiheuttamaa hiilijalanjälkeä ei ole tässä laskentatapauksessa huomioitu. Sen vaikutus rakentamisvaiheen kokonaishiilijalanjälkeen on kuitenkin oletettavasti melko pieni.

Tulokset

Maalämpöä ja –kylmää käyttämällä rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki on **12 637 tn CO₂ ekv**, jos oletetaan rakennuksen sijaitsevan kaukolämpöalueen ulkopuolella. Bruttoneliometriä ja käyttövuotta kohden luku on 26,1 kg CO₂ ekv/brm²/vuosi.

Tulos on 14,2 % pienempi kuin referenssitapauksessa. Jos sen sijaan oletettaisiin rakennuksen sijaitsevan kaukolämpöalueella, rakennuksen hiilijalanjälki kasvaisi maalämpöä käyttämällä 3,5 % verrattuna referenssitapaukseen.



Kuva 27 Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen muodostuminen maalämpöä ja –kylmää käyttäen, jos oletetaan rakennuksen sijaitsevan kaukolämpöalueen ulkopuolella (tn CO₂ ekv)

Energian osuus on nyt 64,2 % ja tuotevaiheen sekä kuljetusten 21,6 %.

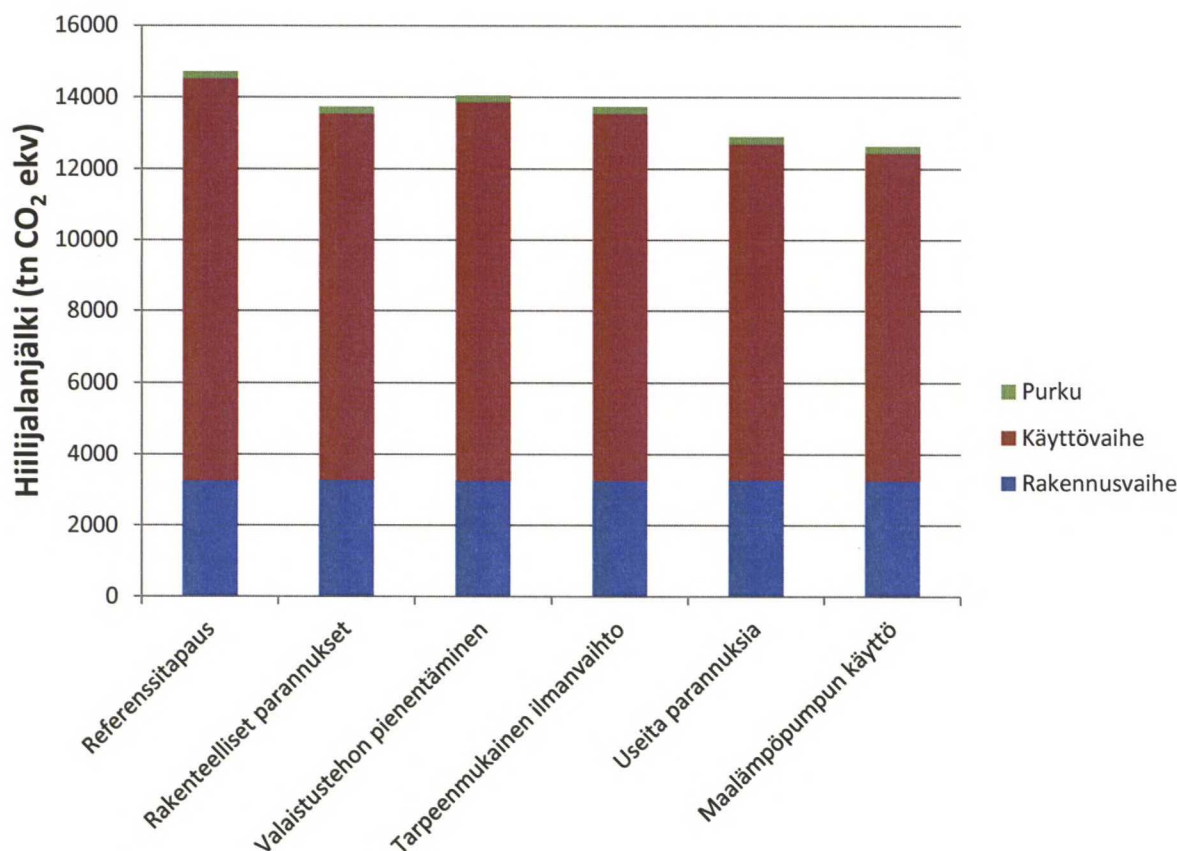
Vuotuinen ostoenergiankulutus on nyt **594,1 MWh**, siis 26,9 % matalampi kuin referenssitapauksessa.

Taulukko 15 Vuotuinen ostoenergiankulutus lajeittain maalämpöä ja -kylmää käyttäen ja sen muutos verrattuna referenssitapaukseen

	Energiamuoto	Ostoenergiantarve (MWh/a)	Muutos
Lämmitys	Sähkö	121,7	-61,3 %
Jäähdytys	Sähkö	38,5	-40,0 %
Laitesähkö	Sähkö	173,8	0,0 %
Valaistus	Sähkö	260,1	0,0 %
Yhteensä		594,1	-26,9 %

Kohta ”Lämmitys” taulukossa sisältää sekä maalämpöjärjestelmän että sähkölämmityksen sähkönkulutuksen. Maalämpöjärjestelmän sähkönkulutus oli 85,6 MWh ja sähkölämmityksen 36,2 MWh. Taulukosta nähdään, että maalämmön käyttö vähensi radikaalisti lämmitysjärjestelmän ostoenergian kulutusta. Täytyy kuitenkin huomioda, että nyt lämmityksen ostoenergia on sähköä, kun aikaisemmissa tapauksissa se oli kaukolämpöä. Myös jäähdytysjärjestelmän ostoenergiankulutus väheni merkittävästi johtuen korkeammasta vuosikylmäkertoimesta.

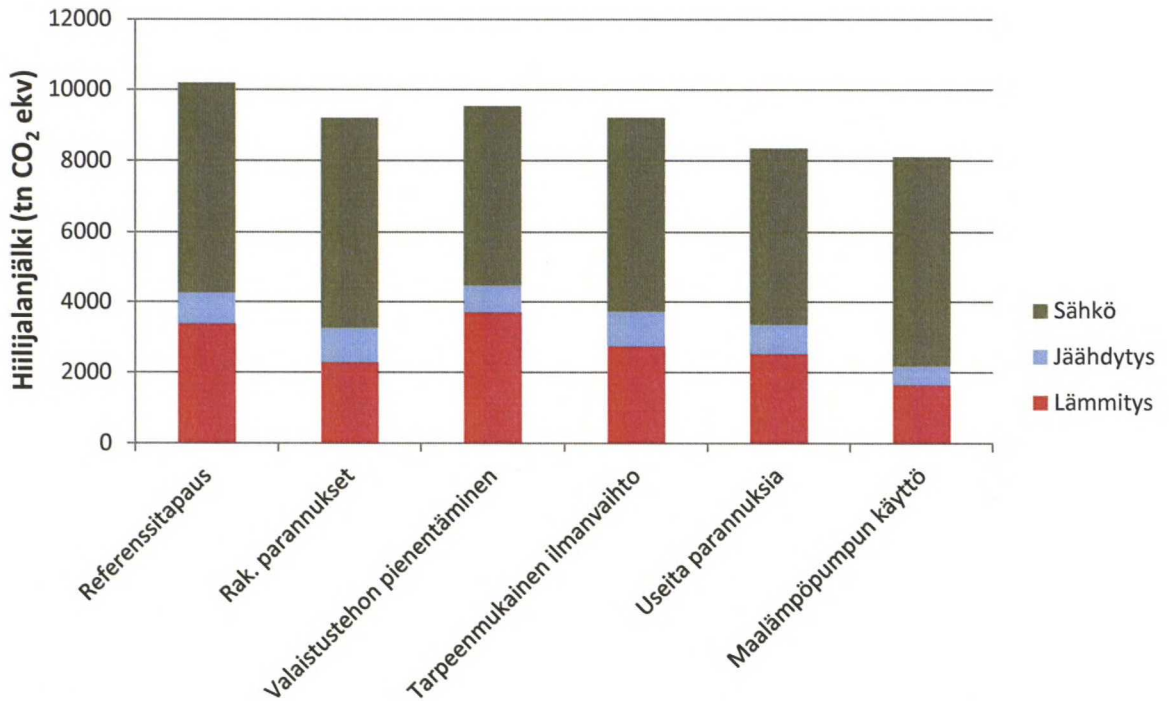
7.9 Johtopäätökset



Kuva 28 Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki eri laskentatapauksissa

Tuloksista nähdään, että kaikilla tutkituilla keinoilla onnistuttiin vähentämään rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeä vähintään useita prosentteja. Yhdessäkään laskentatapauksessa muutos hiilijalanjälkeen ei siis ollut missään nimessä merkityksellinen. Samalla voidaan kuitenkin todeta, että yhdelläkään yksittäisellä energiatehokkuuden parannuksella ei ole mullistavia vaikutuksia rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen. Paras tulos saavutettiin hyödyntämällä maalämpöä ja –kylmää rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysenergian tuotannossa.

Tuloksista voidaan myös päätellä, että tehokkaimmin rakennuksen hiilijalanjälkeä saadaan vähennettyä vaikuttamalla juuri rakennuksen energiankäyttöön, joka muodosti kaikissa laskentatapauksissa yli 64 % rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljestä. Tutkituissa laskentatapauksissa rakennuksen käyttöiän oletettiin olevan 50 vuotta. Korkeammalla käyttöiällä energiankulutuksen osuus korostuisi entisestään. Toiseksi suurimman osa-alueen muodostivat rakennustuotteiden valmistus ja kuljetukset työmaalle. Tämä osa-alue muodosti hiilijalanjäljestä tapauksesta riippuen 18,5–21,6 %. Melko tehokas keino hiilijalanjäljen vähentämiseen on siis luultavasti ympäristötehokkaasti valmistettujen ja vähän kuljetusta vaativien rakennustuotteiden käyttö. Tässä työssä tutkittiin kuitenkin vain energiankäyttöön vaikuttamista. Seuraavaksi suurin osa-alue hiilijalanjäljen muodostumisessa oli kunnossapito (referenssitapauksessa 6,6 %). Työmaatoiminnot, purkuvaihe ja vedenkäyttö muodostivat yhdessä referenssitapauksen hiilijalanjäljestä 5,6 %. Niiden vaikutus oli siis lopputuloksen kannalta melko pieni.



Kuva 29 Energiankulutuksesta aiheutuva hiilijalanjälki rakennuksen koko käyttöajalta eri laskentatapauksissa. On huomioitava, että kohtaan ”sähkö” ei lueta lämmityksen ja jäähdytyksen sähkönkulutusta.

Kuvaajasta nähdään, että sähkön osuus energiankulutuksen hiilijalanjäljestä on suurin. Sen osuus on tapauksesta riippuen 53–73 %. Lämmityksen osuus vuorostaan on 20–39 %. Lämmityksen osuutta pienentää toimistorakennukselle tyypilliset ihmisistä ja toimistolaitteista aiheutuvat suuret lämpökuormat. Jäähdytyksen osuus on kaikissa tapauksissa alle 11 %. Jäähdytyksen pieneen osuuteen vaikuttaa Suomen lyhyt kesä sekä kylmäntuottolaitteiston kylmäkerroin, joka vähentää huomattavasti jäähdytyksen sähkönkulutusta.

Rakenteellisilla parannuksilla saavutettiin 6,6 %:n vähennys verrattuna referenssitapauksen hiilijalanjälkeen. Energiankäytön aiheuttamaa hiilijalanjälkeä rakenteelliset parannukset pienensivät 9,8 %. Rakenteellisilla parannuksilla voidaan siis saavuttaa kohtalaisen merkittäviä parannuksia rakennuksen ympäristö- ja energiatehokkuuteen. Tämän tapauksen tuloksista voidaan myös todeta, että lisäeristäminen ei kasvattanut rakennusvaiheen hiilijalanjälkeä merkittävästi (vain 0,9 %). Lisäeristäminen, rakennuksen tiiviyn parantaminen sekä u-arvoltaan parempien ikkunoiden käyttö vaatii kuitenkin monen asian huomioonottamista rakennusta suunniteltaessa. Etenkin lisäeristäminen saattaa myös kasvattaa tuntuvasti rakennuksen investointikustannuksia.

Valaistustehoa pienentämällä saatiin rakennuksen hiilijalanjälkeä vähennettyä 4,5 %. Energiankäytön aiheuttama hiilijalanjälki väheni 6,5 %. Tämä ei siis ollut aivan yhtä tehokas keino hiilijalanjäljen vähentämiseen kuin rakenteelliset parannukset. Kustannustehokkuudeltaan valaistustehon pienentäminen voi kuitenkin olla varteenotettava keino, etenkin jos pienennys valaistustehossa saavutetaan suunnittelun keinoin. Tällöin ei tarvitse sijoittaa erityisen tehokkaisiin valaisimiin, jotka saattavat tulla kalliiksi.

Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla saavutettiin yllättäen lähes sama elinkaaren hiilijalanjälki kuin rakenteellisilla parannuksilla. Energiankäytön osuus pieneni 9,6 % referenssitapaukseen verrattuna. Tämä johtuu siitä, että ilmamäärien pienentäminen vähensi puhallinsähkön kulutuksen lisäksi merkittävästi myös lämmitysenergian kulutusta. Tarpeenmukainen ilmanvaihto voi kuitenkin olla hankala toteuttaa etenkin koko rakennuksen laajuisena, sillä tällöin lähes jokaisessa huoneessa tulee olla CO₂- tai vastaava mitausanturi. Tämä lisäisi luultavasti rakennusautomaation investointikustannuksia merkittävästi.

Toiseksi paras tulos saavutettiin yhdistämällä rakenteelliset parannukset, valaistustehon pienentäminen ja ilmanvaihdon SFP-luvun pienentäminen. Näin saatiin elinkaaren hiilijalanjälkeä pudotettua jopa 12,4 % verrattuna referenssitapaukseen. Energiankäytön osuus pieneni 18,1 %. Huomioitavaa tässä laskentatapauksessa on, että SFP-luvun pienentämisen vaikutus oli melko mitätön verrattuna muiden parannusten vaikutuksiin. Ilmanvaihdon puhaltimien sähkönkulutus ei siis toimistorakennuksissa yleensä edusta kovin merkittävää osuutta kokonaiskulutuksesta. Useiden energiatehokkuutta parantavien ratkaisujen yhdistäminen vaatii monien asioiden huomioimista rakennusprosessissa. Hankkeen tilaajan tulee tällöin olla valmis panostamaan energiatehokkuuteen investoimalla rakennusvaiheessa tavallista enemmän.

Kaikista pienin hiilijalanjälki saatiin käyttämällä maalämpöä kaukolämpöalueen ulkopuolella sijaitsevan rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysenergian tuotantoon. Näin saatiin 14,2 % pienempi tulos kuin referenssitapauksessa. Energian osuus hiilijalanjäljestä pieneni 20,4 %. Yllättävää tässä tapauksessa oli, että mitoittamalla maalämpöpumppu vain 19,6 %:iin lämmityksen huipputehosta, sillä kuitenkin saatiin tuotettua jopa 88,5 % rakennuksen lämmitysenergiasta. Sähkövastuksilla jouduttiin siis tuottamaan vain 11,5 % lämmitysenergiasta. Lämmitystehon pysyvyyskäyrä rakennuksessa oli poikkeuksellisen jyrkkä suurimpien tehojen kohdalla. On kuitenkin huomioitava, että kaukolämpöalueella sijaitsevan rakennuksen kohdalla maalämmön käyttö ei ole ympäristötehokasta johtuen marginaalisähkön korkeasta päästökertoimesta. Jos rakennuksen oletetaan sijaitsevan kaukolämpöalueella, hiilijalanjälki kasvaisi maalämpöä käyttämällä 3,5 % verrattuna referenssitapaukseen. Kaukolämpöalueen ulkopuolella maalämpö on kuitenkin yleensä sekä kustannus- että ympäristötehokas lämmitysmuoto. On huomioitava myös, että maalämpöpumpun vuotuiset lämpö- ja jäähdytyskertoimet arvioitiin tässä laskentatapauksessa, mikä aiheuttaa jonkin verran epätarkkuutta tuloksiin. Todellisessa maalämpöprojektissa nämä arvot tulisi selvittää simuloinneilla.

Esitetyt tulokset eivät ole täysin tarkkoja. Esimerkiksi rakennusvaiheen hiilijalanjälkeä laskettaessa on huomioitu vain merkittävimmät rakennusosat. Mm. talotekniikkaa ei ole huomioitu. Kokonaisuuden kannalta vähämerkityksisiä hiilijalanjäljen aiheuttajia, kuten korjaukset ja osien vaihto on myös jätetty huomioimatta. Lisäksi tulokset ovat aina rakennuskohtaisia, ja jokaiselle rakennushankkeelle tulee tehdä elinkaaritarkastelut erikseen. Tuloksista voidaan kuitenkin päätellä ainakin suuruusluokkaa erilaisten suunnitteluratkaisujen potentiaalille rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen vähentämisessä.

Tämänkaltaiset elinkaaritarkastelut vievät toimistorakennushankkeissa tyypillisesti 100–200 tuntia aikaa. Jos halutaan että elinkaaritarkasteluilla on todellista vaikutusta suunnitteluun ja rakentamiseen, tulee ensimmäiset tarkastelut tehdä jo hankesuunnitteluvaiheessa. Tarkemmat laskelmat on syytä tehdä jo seuraavassa vaiheessa (ehdotussuunnit-

telu). Elinkaaritarkastelut on myös huomioitava rakennuksen suunnittelukustannuksissa.
(Husu 2013)

8 Yhteenveto

Tämän diplomityön tarkoitus oli selvittää miten ja kuinka paljon toimistorakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen voidaan vaikuttaa energiatehokkaan suunnittelun keinoin. Työn teoriaosuudessa tutkittiin rakennuksen ympäristötehokkuuteen vaikuttavia asioita, energiatehokkuuden mittareita ja indikaattoreita, rakentamisen suunnitteluprosessia sekä hiilijalanjäljen laskentaa. Laskentaosiossa tutkittiin esimerkkirakennuksen avulla erilaisen energiatehokkuuteen vaikuttavien suunnitteluratkaisujen vaikutusta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen. Työssä saavutettiin sille asetetut tavoitteet.

Rakennusten ympäristötehokkuudella tarkoitetaan rakennuksen kykyä tuottaa hyödykkeitä käyttäjilleen, niin että tästä toiminnasta koituu mahdollisimman vähän haittaa ympäristölle. Yksi tapa mitata rakennuksen aiheuttamaa kuormitusta ympäristölle, on rakennuksen hiilijalanjälki. Energiankäyttö muodostaa ylivoimaisesti suurimman osan rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljestä. Rakennuksen energiankäyttö koostuu lämmityksestä, jäähdytyksestä ja sähkönkulutuksesta. Lämmityksen energiankulutusta voidaan pienentää käyttämällä vähähiilistä lämmitysmuotoa, parantamalla rakennuksen vaipan eristävyyttä, vähentämällä ilmanvaihdon ilmamääriä ja lämpimän käyttöveden kulutusta. Jäähdytyksen energiankulutusta taas voidaan pienentää käyttämällä tehokasta kylmälaitteistoa, vähentämällä rakennuksen ulkoisia kuormia esim. varjostinratkaisuilla ja vähentämällä rakennuksen sisäisiä kuormia käyttämällä sähköä tehokkaasti käyttäviä laitteita ja valaistusta. Kaukojäähdytykseen siirtyminen myös yleensä pienentää jäähdytyksen aiheuttamaa hiilijalanjälkeä, sillä kaukojäähdytyksen tuotannossa käytetään paljon energiaa, joka menisi muuten hukkaan. Sähkönkulutus (pl. lämmitys- ja jäähdytys-sähkö) toimistorakennuksessa muodostuu LVI-laitteiden (lähinnä ilmanvaihto), valaistuksen ja kuluttajalaitteiden käyttämästä energiasta. Ilmanvaihdon sähkönkulutusta voidaan vähentää käyttämällä pienempiä ilmamääriä, mitoittamalla ilmanvaihtokanavat väljiksi sekä käyttämällä tehokkaita puhaltimia. Valaistuksen kulutusta voidaan vuorostaan vähentää energiatehokkaalla valaistussuunnittelulla, käyttämällä korkean valotehokkuuden omaavia valaisimia sekä hyödyntämällä päivänvaloa rakennuksessa. Rakennuksen ostosähkönkulutusta voidaan vähentää myös tuottamalla osa tarvittavasta sähköstä aurinkokennoilla paikan päällä.

Rakennusten energiatehokkuuden mittaamiseksi on kehitetty lukuisia erilaisia mittareita ja indikaattoreita. Tärkein viranomaisten käyttämä mittari rakennuksen energiatehokkuudelle on Suomessa E-luku. E-luku lasketaan rakennuksen standardikäytöllä ja se on energiamuotokohtaisilla kertoimilla kerrottu vuotuinen ostoenergiankulutus lämmitettyä nettoalaa kohti (kWh/m^2). Rakennusmääräyksissä on määriteltä rakennuskohtaisesti suurimmat sallitut E-luvut.

Myös yksityisellä sektorilla on kehitetty useita mittareita ja indikaattoreita rakennuksen energiatehokkuudelle. Tässä työssä käsiteltiin Green Building Council Finland:n vetämän Värkki-projektissa kehitettyjä käytönajan mittareita rakennuksen ympäristötehokkuudelle. Energiankulutus mittaa rakennuksen käytön todellista energiankulutusta sisältäen kaikki energiamuodot. Käytön hiilijalanjälki mittaa kiinteistön hiilidioksidipäästöjä käytön aikana. Molemmat mittarit voidaan määritellä erikseen kiinteistön käyttäjälle ja omistajalle. Pohjateho on mittari, joka kertoo rakennuksen energiankulutuksen silloin, kun rakennus ei varsinaisesti tuota mitään palveluita käyttäjilleen (esim. kun rakennus on tyhjillään). Mittarin tarkoitus on auttaa tunnistamaan ja karsia tarpeetonta kulutusta

rakennuksessa. Lisäksi käytönajan mittareihin kuuluu sisäympäristöön tyytyväisten osuus, jota mitataan säännöllisillä kyselytutkimuksilla.

Työn laskentaosiossa tutkittiin erilaisten suunnitteluratkaisujen vaikutusta Granlund Oy:n pääkonttorin laskennalliseen elinkaaren hiilijalanjälkeen. Hiilijalanjäljet laskettiin olettaen, että kyseessä on vasta suunniteltava ja rakennettava uudisrakennus. Laskenta noudatti Värkki-projektin julkaisussa ”Rakennusten elinkaarimittarit” kuvattua laskentamenetelmää. Rakennustuotteiden valmistuksen ja kuljetusten aiheuttama hiilijalanjälki laskettiin VTT:n ja Pöyryn kehittämällä ILMARI laskentatyökalulla. Rakennuksen energiankulutus simuloitiin Granlundin kehittämällä RIUSKA ohjelmalla. Aluksi laskettiin hiilijalanjälki vuoden 2013 rakennusmääräysten mukaisilla järjestelmillä (referenssitapaus). Tätä seuraavissa laskentatapauksissa rakennuksen energiatehokkuutta parannettiin aina jollain tietyllä tavalla, ja saatua tulosta verrattiin referenssitapauksen tulokseen.

Tuloksista voidaan päätellä, että energiankäyttö todellakin on merkittävin asia rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen kannalta. Kaikissa laskentatapauksissa energiankäyttö muodosti yli 64 % rakennuksen hiilijalanjäljestä. Toiseksi suurimman osuuden muodostivat rakennustuotteiden valmistus ja kuljetukset työmaalle (tapauksesta riippuen 18,5–21,6 %).

Pienentämällä valaistustehoa ($15 \text{ W/m}^2 \rightarrow 10 \text{ W/m}^2$) saatiin elinkaaren hiilijalanjälkeä pienennettyä 4,5 %. Valaistustehoa voidaan pienentää esimerkiksi käyttämällä paremman valotehokkuuden omaavia valaisimia tai hyödyntämällä päivänvaloa rakennuksessa. Vaikka hiilijalanjäljen oli tässä tapauksessa suurin (pl. referenssitapaus), valaistustehon pienentäminen voi olla kustannustehokas tapa pienentää rakennuksen hiilijalanjälkeä, etenkin jos pienennys valaistustehossa saavutetaan suunnittelun keinoin.

Rakenteellisilla parannuksilla pienennys oli 6,6 %. Tässä laskentatapauksessa parannettiin ulkoseinien, maanvaraisen alapohjan ja ikkunoiden U-arvoja 20 %. Lisäksi rakennuksen vuotoilmaluku oli vain puolet referenssitapauksen vuotoilmaluvusta. Eristepaksuuden kasvattaminen kasvatti rakennustuotteiden aiheuttamaa hiilijalanjälkeä vain 0,9 %. Rakenteellisilla parannuksilla saavutettiin tuntuva vähennys elinkaaren hiilijalanjäljessä. Ylimääräinen eristäminen ja parempien ikkunoiden käyttö voi kuitenkin lisätä rakennuksen investointikustannuksia merkittävästi.

Samaan tulokseen päästiin myös käyttämällä rakennuksessa tarpeenmukaista ilmanvaihtoa. Tarpeenmukainen ilmanvaihto voidaan toteuttaa esimerkiksi CO₂-mittaukseen perustuvalla henkilömäärän arvioinnilla. Tulos oli yllättävän hyvä johtuen ilmanvaihdon lämmitystarpeen pienentymisestä matalampien ilmamäärien johdosta. Tarpeenmukainen ilmanvaihto vaatii kuitenkin paljon rakennusautomaatiolta, sillä lähes jokaisessa huoneessa tulee tällöin olla CO₂- tai vastaava anturi, jotta huoneiden henkilömäärä kullakin ajanhetkellä voidaan arvioida.

Erittäin hyvä tulos (12,2 % pienennys hiilijalanjälkeen) saavutettiin yhdistämällä useita energiatehokkuutta parantavia toimenpiteitä samaan laskentatapaukseen. Tapauksessa oli mukana rakenteelliset parannukset, valaistustehon pienentäminen sekä ilmanvaihdon SFP-luvun pienentäminen.

Pienimpään hiilijalanjälkeen päästiin hyödyntämällä maalämpöä ja –kylmää kaukolämpöalueen ulkopuolella sijaitsevassa rakennuksessa. Näin saatiin jopa 14,2 % pienempi tulos kuin referenssitapauksessa. Mitoittamalla maalämpöpumppu 19,6 %:iin lämmityksen huipputehosta, sillä saatiin tuotettua jopa 88,5 % vuotuisesta lämmitysenergiasta. Lämmityksen vuosilämpökertoimen arvioitiin olevan 3,25. Käyttämällä maalämpöpumpun porakaivoa vapaajäähdytykseen arvioitiin, että rakennuksen jäähdytyksen vuosikylmäkerroin nousee kolmesta viiteen. On kuitenkin huomioitava, että kaukolämpöalueella sijaitsevan rakennuksen kohdalla maalämpö ei ole ympäristötehokas vaihtoehto johtuen marginaalisähkön korkeasta päästökertoimesta. Marginaalisähköllä tarkoitetaan ”ylimääräistä” sähköä, joka joudutaan tuottamaan, kun kaukolämpöalueella sijaitsevassa rakennuksessa käytetään lämmitykseen sähköä. Kaukolämpöalueen ulkopuolella maalämpö kuitenkin on yleensä sekä ympäristö- että kustannustehokas lämmitysmuoto.

Tuloksista nähdään, että yksittäisilläkin parannuksilla energiatehokkuuteen voidaan pienentää rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeä tuntuvasti. Missään laskentatapauksessa vaikutus hiilijalanjälkeen ei ollut merkityksetön. Kuitenkin, jos hiilijalanjälkeä halutaan pienentää suuresti, tulee yhdistää useita energiatehokkuutta parantavia keinoja tai vaikuttaa rakennuksen lämmitysmuotoon.

Uudisrakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen merkittävä pienentäminen vaatii ympäristötehokkuuden huomioimista kaikissa rakennushankkeen vaiheissa. Ensimmäiset elinkaaritarkastelut on tehtävä jo hankesuunnitteluvaiheessa ja tarkemmat laskelmat jo ehdotussuunnitteluvaiheessa. Myös yhteistyön hankkeen eri osapuolien ja eri suunnittelualojen edustajien välillä tulee olla saumatonta.

Jatkotutkimustarpeet

Tässä työssä tutkittiin erilaisten suunnitteluratkaisujen vaikutusta toimistorakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen. Työn laajuuden puitteissa ei kuitenkaan voitu laskennallisesti tutkia näiden ratkaisujen taloudellisia vaikutuksia. Tällaiselle tarkastelulle olisi tilausta. Olisi hyödyllistä tarkastella erilaisten suunnitteluratkaisujen hintaa suhteessa saavutettaviin hiilijalanjäljen pienennyksiin. Hintaa laskettaessa tulisi huomioida sekä ratkaisujen investointikustannukset että energiansäästön aiheuttamat kustannussäästöt. Näin voitaisiin selvittää taloudellisesti optimaaliset keinot toimistorakennuksen hiilijalanjäljen vähentämiseen.

9 Lähteet

Airaksinen, M. & Matilainen, P. 2011. A Carbon Footprint of an Office Building. *Energies*, vol 4:8. S. 1197–1210.

Aman, M.M. & Jasmon, G.B. & Mokhlis, H. & Bakar, A.H.A. 2013. Analysis of the performance of domestic lighting lamps. *Energy Policy*, vol 52. S. 482–500.

Artmann, N. & Manz, H. & Heiselberg, P. 2007. Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe. *Applied Energy*, vol 84:2. S. 187–201.

Baetens, R. & Jelle, B.P. & Thue, J.V. & Tenpierik, M.J. 2010. Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. *Energy and Buildings*, vol 42:2. S. 147–172.

Baetens, R. & Jelle, B.P. & Gustavsen, A. 2011. Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, vol 43:4. S. 761–769.

Celik, A.N. & Muneer, T. & Clarke, P. 2009. A review of installed solar photovoltaic and thermal collector capacities in relation to solar potential for the EU-15. *Renewable Energy*, vol 34:3. S. 849–856.

Dubois, M. & Blomsterberg, Å. 2011. Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review. *Energy and Buildings*, vol 43:10. S. 2572–2582.

Dussault, J. & Gosselin, L. & Galstian, T. 2012. Integration of smart windows into building design for reduction of yearly overall energy consumption and peak loads. *Solar Energy*, vol 86:11. S. 3405–3416.

Energiatallisuus. 2013. Kaukolämmitys. Saatavissa: <http://energia.fi/koti-ja-lammitys/kaukolammitys> .

European Commission. 2012a. Energy roadmap 2050. Luxembourg: Publications Office of the European Union. ISBN: 978-92-79-21798-2.

European Commission. 2012b. EU:n ENERGY STAR -Energiatallustekniikoiden toimistolaitteiden merkinnät. Saatavissa: <http://www.eu-energystar.org/fi/index.html#note1> .

European Solar Thermal Industry Federation. 2011. Solar Thermal Markets in Europe: Trends and Market Statistics 2011. Saatavissa: http://www.estif.org/statistics/st_markets_in_europe_2011/ .

Flyktman, M. & Helynen, S. 2004. Hyötysuhteiden määrittäminen päästökaupan alkujakoa varten, tutkimuslaskelma. VTT. Saatavissa: [http://julkaisurekisteri.ktm.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/a8c79e11f75754f6c2256ba4002dbfa1/e1f0feb56dfdc0f7c225716b003b526c/\\$FILE/hyotysuhteiden_maarittaminen_04.pdf](http://julkaisurekisteri.ktm.fi/ktm_jur/ktmjur.nsf/a8c79e11f75754f6c2256ba4002dbfa1/e1f0feb56dfdc0f7c225716b003b526c/$FILE/hyotysuhteiden_maarittaminen_04.pdf) .

Galasiu, A.D. & Atif, M.R. & MacDonald, R.A. 2004. Impact of window blinds on daylight-linked dimming and automatic on/off lighting controls. *Solar Energy*, vol 76:5. S. 523–544.

Green Building Council Finland. 2013a. Järjestön internetsivut. Saatavissa: <http://figbc.fi/> .

Green Building Council Finland. 2013b. Rakennusten elinkaarimittarit. Saatavissa: http://www.bionova.fi/files/rakennusten_elinkaarimittarit_2013.pdf .

Gyproc. 2011. Gyproc GS, teräsrunkoiset kipsilevyseinät. Saatavissa: <http://www.gyproc.fi/ratkaisut/valiseinat/gyproc-gs> .

Hagberg, L. & Särnholm, E. & Gode, J. 2009. LCA calculations on Swedish wood pellet production chains. Ruotsi: Swedish Environmental Research Institute (IVL). Saatavissa: <http://www3.ivl.se/rapporter/pdf/B1873.pdf> .

Heimonen, I. & Hemmilä, K. & Saarni, R. 1999. Tulevaisuuden ikkunoiden kehitysperusteet ja valinta. Espoo: VTT. ISBN: 951-38-5430-2.

Heiskanen, E. & Lovio, R. & Jalas, M. 2011. Path creation for sustainable consumption: promoting alternative heating systems in Finland. *Journal of Cleaner Production*, vol 19:16. S. 1892–1900.

Heljo, J. & Laine, H. 2005. Sähkölämmitys ja lämpöpumput sähkönkäyttäjinä ja päästöjen aiheuttajina Suomessa. Raportti. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakentamistalouden laitos. Tampere. Saatavissa: http://webhotel2.tut.fi/ee/Materiaali/Ekorem/EKOREM_LP_ja_sahko_raportti_051128.pdf .

Helsingin Energia. 2011. Kaukojäähdytyksen yleisesite. Saatavissa: http://www.helen.fi/kaukojaahdytys/kj_asiakkaat.html .

Helsingin Energia. 2012. Kaukolämmön alkuperä ja ominaispäästöt. Saatavissa: http://www.helen.fi/ymparisto/kaukolampo_alkupera.html .

Helsingin Energia. 2013. Kaukojäähdytyksen kytkentäkaavio 1 (alle 300 kW). Saatavissa: http://www.helen.fi/pdf/kj/fi/jarjestelmaohjeet/kytkentakaavio_1_alle_300.pdf .

Helsingin seudun ympäristöpalvelut. 2011. Vesiyleisesite. Saatavissa: http://www.hsy.fi/vesi/Documents/Ohjeet_ja_esitteet/HSY_vesiyleisesite_A4_2010_10_032011_FIN.pdf .

Helsingin seudun ympäristöpalvelut. 2012. HSY:n energiatase ja kasvihuonekaasujen päästöt 2011. Saatavissa: http://www.hsy.fi/tietoahsy/Documents/Julkaisut/12_2012_HSYn_energiatase_ja_kasvi_huonekaasujen_paastot_2011.pdf .

Helsingin seudun ympäristöpalvelut. 2013. Vesihuolto: ”Juomavesi ja veden laatu” ja ”Jätevedenpuhdistus”. Saatavissa: <http://www.hsy.fi/VESI/Sivut/default.aspx> .

Holopainen, R. & Hekkanen, M. & Hemmilä, K. & Norvasuo, M. 2007. Suomalaisten rakennusten energiakorjausmenetelmät ja säästöpotentiaalit. Espoo: VTT. ISBN: 978-951-38-6908-3. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2377.pdf> .

Husu, T. 2013. Haastattelu.

Häkkinen, T. 2011. ILMARI Taustamateriaalit. VTT. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/files/sites/ilmari/hiilijalanjalki.pdf> .

Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. Net Global Radiative Forcing, Global Warming Potentials and Patterns of Forcing. Saatavissa: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/tssts-2-5.html .

Jelle, B.P. & Breivik, C. & Røkenes, H. D. 2012. Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities. Solar Energy Materials and Solar Cells, vol 100. S. 69–96.

Johnson, E. 2009. Goodbye to carbon neutral: Getting biomass footprints right. Environmental Impact Assessment Review, vol 29:3. S. 165–168.

Jokisalo, J. & Kurnitski, J. & Korpi, M. 2009. Building leakage, infiltration, and energy performance analyses for Finnish detached houses. Building and Environment, vol 44:2. S. 377–387.

Kawamoto, K. & Shimoda, Y. & Mizuno, M. 2004. Energy saving potential of office equipment power management. Energy and Buildings, vol 36:9. S. 915–923.

Kaynakli, O. 2012. A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 16:1. S. 415–425.

Keto, M. 2010. Energiamuotojen kerroin: Yleiset perusteet ja toteutuneen sähkön- ja lämmöntuotannon kertoimet 2000–2008, Raportti ympäristöministeriölle. Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulu, Energiatekniikan laitos. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=123453&lan=fi> .

Lehtonen, M. 2010. ENETE. ST-poolin tutkimusseminaari. Aalto-yliopisto. Sähkötekniikan laitos. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/dokumentit/energiatollisuus/Tutkimus/ST-pooli/esitys_matti_lehtonen_enete.pdf .

Linden, M. & Peltola-Ojala, P. The deregulation effects of Finnish electricity markets on district heating prices. Energy Economics, vol 32:5. S. 1191–1198.

Mardiana-Idayu, A. & Riffat, S.B. 2012. Review on heat recovery technologies for building applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 16:2. S. 1241–1255.

Motiva. 2003. CO₂-kertoimet. Saatavissa:

http://www.motiva.fi/extranet/energiakatselmoijat/katselmoijan_tyokaluja/co2-kertoimet .

Motiva. 2011. Maalämpöpumput suurissa kiinteistöissä – mitoitus, soveltuvuus, toiminta. Saatavissa:

http://energia.fi/sites/default/files/dokumentit/ajankohtaista/Tapahtumat/2012/lu_seuna_lampopumppufinlandia-taloenergiateollisuusfinal14122011.pdf .

Motiva. 2012. Aurinkolämpö. Saatavissa:

http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/aurinkoenergia/aurinkolampo .

Niskanen, V. 2013. Avoin energiaverkko –konsepti ja rakennusten jäähdytysjärjestelmien hukkalämmön hyödyntäminen. Diplomityö. Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulu, Energiatekniikan laitos. Espoo.

Paakkari, J. 2011. Lämpöeristeet. Kandidaatintyö. Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulu, Energiatekniikan laitos. Espoo.

Papadopoulos, A.M. & Giama, E. 2007. Environmental performance evaluation of thermal insulation materials and its impact on the building. Building and Environment, vol 42:5. S. 2178–2187.

Parameshwaran, R. & Kalaiselvam, S. & Harikrishnan, S. & Elayaperumal, A. 2012. Sustainable thermal energy storage technologies for buildings: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 16:5. S. 2394–2433.

Pasanen, P. & Korteniemi, J. & Sipari, A. 2011. Passiivitason asuinkerrostalon elinkaaren hiilijalanjälki. Helsinki: Sitra. ISBN: 978-951-563-820-5. Saatavissa:

<http://www.sitra.fi/julkaisu/2011/passiivitason-asuinkerrostalon-elinkaaren-hiilijalanjalki> .

RAKLI ry. 2012. Rakennushankkeen johtamisen ja suunnittelun tehtäväluetteloiden uudistaminen. Saatavissa: <http://www.rakli.fi/linkit/kehitysjaprojektit/telu2012/> .

RT 10-10387. 1989. RT-ohjekortti: Talonrakennushankkeen kulku. Helsinki: Rakennustietosäätiö.

RT 83-10902. 2007. RT-ohjekortti: Välipohjarakenteita. Helsinki: Rakennustietosäätiö.

RT 82-10903. 2007. RT-ohjekortti: Väliseinärakenteita. Helsinki: Rakennustietosäätiö.

RT 82-11006. 2010. RT-ohjekortti: Ulkoseinärakenteita. Helsinki: Rakennustietosäätiö.

RT 83-11009. 2010. RT-ohjekortti: Alapohjarakenteita. Helsinki: Rakennustietosäätiö.

RT 83-11010. 2010. RT-ohjekortti: Yläpohjarakenteita. Helsinki: Rakennustietosäätiö.

Salmi, J. 2013. Helsingin Energian tuotepäällikkö. Sähköpostikeskustelu.

Self, S.J. & Reddy B.V. & Rosen M.A. 2013. Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. Applied Energy, vol 101. S. 341–348

Seppänen, O. 1996. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Anjalankoski: SOLVER palvelut Oy. ISBN: 951-96998-0-6.

Seppänen, O. 2001. Rakennusten lämmitys. Helsinki: Suomen LVI-liitto ry. ISBN: 951-98811-0-7.

SFS-EN 15804. 2012. Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

SFS-EN 15978. 2012. Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

Sitra. 2012. Aurinkosähkön ja muun uusiutuvan pientuotannon edistäminen Suomessa, keskustelupaperi. Saatavissa:
http://www.sitra.fi/sites/default/files/u489/sahkon_pientuotanto_keskustelupaperi_2012-9-3.pdf .

Snäkin, J.-P.A. 2000. An engineering model for heating energy and emission assessment The case of North Karelia, Finland. Applied Energy, vol 67:4. S. 353–381.

Stammeier, H. 2010. Maalämmön ja maakylmän hyödyntäminen toimistorakentamisessa. Diplomityö. Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulu, Energiatekniikan laitos. Espoo.

Suomen Kaasuyhdistys. 2010. Maakaasukäsikirja. Saatavissa:
http://www.maakaasu.fi/sites/default/files/pdf/kasikirja/kasikirja_20110307.pdf .

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2012. Matalaenergiarakentaminen. Toimitilat. Suomi: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. ISBN 978-951-758-538-5.

Suomen talotekniikan kehityskeskus. 2001. Talotekniikan elinkaaritarkastelut. Suomi: Forssan Kirjapaino Oy. ISBN: 952-5411-07-09.

Säteri, J. 2008. Sisäilmastoluokitus 2008 Sisäympäristön uudet tavoitearvot. Espoo: Sisäilmayhdistys ry. Saatavissa:
<http://www.sisailmayhdistys.fi/attachments/kehityshankkeet/sisailmastoluokitus2008-esittely.pdf> .

Tilastokeskus. 2007. Suomen virallinen tilasto (SVT): Rakennuskanta [verkkojulkaisu]. Saatavissa: <http://www.stat.fi/til/rak/tau.html> .

Toivanen, T. 2010. Vapaajäähdytyksen toiminnan tutkiminen. Opinnäytetyö. Mikkelin ammattikorkeakoulu, Talotekniikka. Mikkeli.

Tyagi, V.V. & Kaushik, S.C. & Tyagi, S.K. & Akiyama, T. 2011. Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 15:2. S. 1373–1391.

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2012. Tuen enimmäismäärät. Saatavissa: <http://www.tem.fi/index.phtml?s=3093> .

Tzempelikos, A. & Athienitis, A.K. 2007. The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand. Solar Energy, vol 81:3. S. 369–382.

Valli, M. 2013. BIM ja laatu: suunnittelijat innoissaan. Talotekniikka. Numero 01/2013. S. 48–50.

Vares, S. & Häkkinen, T. & Shemeikka, J. 2011. Kestävän rakentamisen tavoitteet ja niiden toteutuminen. Suomi: VTT. ISBN: 978-951-38-7692-0.

Virta. 2012. Alkusanat ja Värkki-projektin esittely [video]. Saatavissa: <http://vimeo.com/36685023> .

VTT. 2012. LIPASTO liikenteen päästöt. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/index.htm> .

Wang, G. & Song, L. 2012. Air handling unit supply air temperature optimal control during economizer cycles. Energy and Buildings, vol 49. S. 310–316.

Yang, X. & Jin, X. & Du, Z. 2011. Evaluation of four control strategies for building VAV air-conditioning systems. Energy and Buildings, vol 43:2–3. S. 414–422.

Ylinen, M. 2010. Lämmitystekniikka: luentokalvot. Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulu, Energiatekniikan laitos. Espoo.

Ympäristöministeriö. 2003. Ympäristöministeriön moniste 122: Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto lämpöhäviöiden tasauslaskennassa. Saatavissa: http://teknologiateollisuus.fi/file/3778/lto_opas_122_lopullinen.pdf.html .

Ympäristöministeriö. 2007a. Suomen rakentamismääräyskokoelma D1, Kiinteistöjen vesi- ja viemärlaitteistot, määräykset ja ohjeet. Saatavissa: http://www.finlex.fi/data/normit/28208-D1_2007.pdf.

Ympäristöministeriö. 2007b. Suomen rakentamismääräyskokoelma D5, Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta, ohjeet. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/data/normit/29520-D5-190607-suomi.pdf> .

Ympäristöministeriö. 2009a. Työryhmämuistio: Huoneistokohtaisten vesimittareiden käyttö ja vaikutukset rakennusten energiankulutukseen. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=104742&lan=sv> .

Ympäristöministeriö. 2009b. Energiatodistusopas 2007: Rakennuksen energiatodistus ja energiatehokkuusluvun määrittäminen. Saatavissa: <http://energiatodistus.motiva.fi/energiatodistukset/pienetasuinrakennukset/> .

Ympäristöministeriö. 2010. Suomen rakentamismääräyskokoelma D2, Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, määräykset ja ohjeet. Saatavissa: http://www.finlex.fi/data/normit/34164-D2-2010_suomi_22-12-2008.pdf .

Ympäristöministeriö & Sitra & Tekes. 2010. ERA17 Energiaviisaan rakennetun ympäristön aika. Helsinki: Ympäristöministeriö & Sitra & Tekes. ISBN: 978-952-11-3791-4. Saatavissa: http://era17.fi/wp-content/uploads/2010/10/ERA17_loppuraportti.pdf .

Ympäristöministeriö. 2011a. Uudet rakentamisen energiamääräykset annettu [tiedote]. Saatavissa: <http://valtioneuvosto.fi/ajankohtaista/tiedotteet/tiedote/fi.jsp?oid=325104> .

Ympäristöministeriö. 2011b. Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=120444> .

Ympäristöministeriö. 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma D3, Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet 2012. Saatavissa: http://www.finlex.fi/data/normit/37188-D3-2012_Suomi.pdf .

Ympäristöministeriö. 2013. Rakennuksen energiatodistus uudistuu, esitys. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=139781&lan=fi> .

Liite 1 (1/1)

Referenssitapaus – energiasimulointi


RAKENNUKSEN ENERGIASIMULOINTI
ENERGIANTARVE (NETTOTARVE)

RYM PRE-ohjelma

NewWoW

Asiakirja n:o

Projekti n:o

Pvm.

Lähtijä/Tark.

Viim. muutos

Laadittu

18.4.2013 jip

PERUSTIEDOT:

Rakennuksen bruttoala: 9 696,1 brm²Rakennuksen tilavuus: 23 482,0 m³

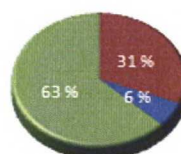
Simuloinnin kuvaus:

Tavoite-energiakulutus, 2013 määräysten mukaiset järjestelmät, vessojen käytävät erillisellä koneella

HUOM! Sisältää myös käyttäjä sähköön kulutuksen, joka ei ole mukana diplomityön tarkasteluissa

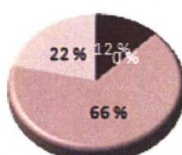
VUOTUINEN ENERGIANTARVE

	MWh	kWh/m ²	kWh/m ³
Lämmitysenergia	314	32,4	13,4
Jäähdytysenergia	64	6,6	2,7
Sähköenergia yht.	640	66,0	27,2
-LVI, muu sähkö	94	9,7	4,0
-Valaistussähkö	260	26,8	11,1
-Laitesähkö	285	29,4	12,2



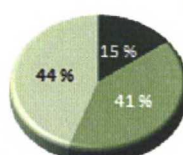
■ Lämmitysenergia
■ Jäähdytysenergia
■ Sähköenergia yht.

Lämmitysenergia



■ Lämmin käyttövesi
■ Lämmitys, muu
■ Lämmitys, tilat
■ Lämmitys, IV-koneet

Sähkö



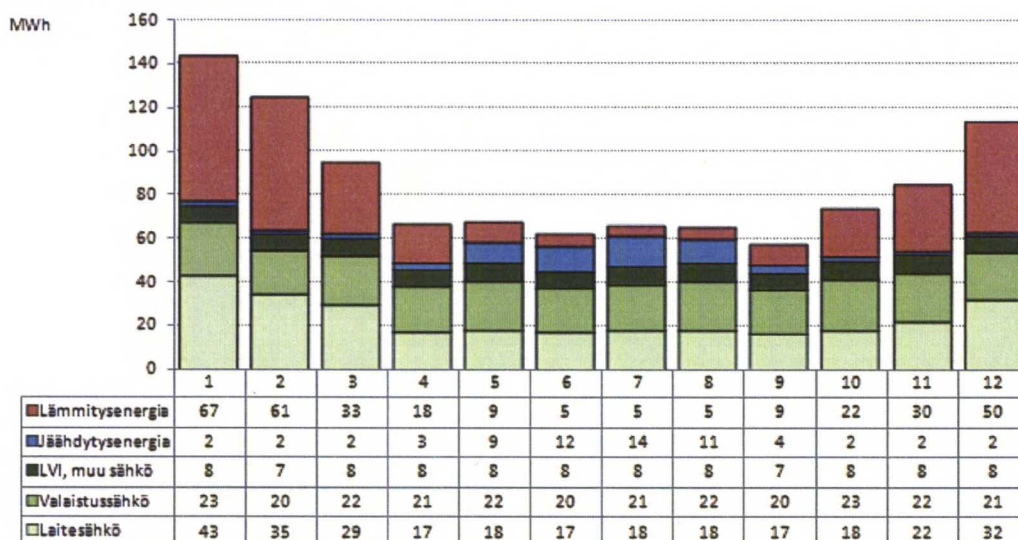
■ LVI, muu sähkö
■ Valaistussähkö
■ Laitesähkö

Kiinteistö- ja käyttäjä sähkö



■ Kiinteistösähkö ■ Käyttäjäsähkö

KUUKAUSITTAINEN ENERGIANTARVE



Liite 2 (1/1)
Referenssitapaus - rakennusmateriaalit (mod. A1-A4)

121 Perustukset			
Antura:	408 CO ₂ eq kg / m ³	230 m ³	94006 CO ₂ eq kg
Paalut250:	385 CO ₂ eq kg / m ³	114 m ³	43772 CO ₂ eq kg
Paalut300:	365 CO ₂ eq kg / m ³	207 m ³	75508 CO ₂ eq kg
Perustusseinät:	350 CO ₂ eq kg / m ³	171 m ³	59719 CO ₂ eq kg
Yhteensä:		722 m ³	273006 CO ₂ eq kg
122 Alapohjat			
AP 1:	79 CO ₂ eq kg / m ²	614 m ²	48543 CO ₂ eq kg
AP 2:	167 CO ₂ eq kg / m ²	2373 m ²	395296 CO ₂ eq kg
Pilarit:	372 CO ₂ eq kg / m ³	31 m ³	11493 CO ₂ eq kg
VP:	95 CO ₂ eq kg / m ²	4316 m ²	409689 CO ₂ eq kg
YP:	174 CO ₂ eq kg / m ²	3033 m ²	528280 CO ₂ eq kg
Yhteensä:		10367 m ²	1393301 CO ₂ eq kg
124 Julkisivut			
US:	107 CO ₂ eq kg / m ²	3951 m ²	422345 CO ₂ eq kg
Ikkunat:	21 CO ₂ eq kg / m ²	915 m ²	18754 CO ₂ eq kg
Yhteensä:		4866 m ²	441099 CO ₂ eq kg
131 Tilan jako-osat			
KS:	56 CO ₂ eq kg / m ²	2207 m ²	122779 CO ₂ eq kg
VS:	74 CO ₂ eq kg / m ²	6000 m ²	446432 CO ₂ eq kg
Yhteensä:		8208 m ²	569211 CO ₂ eq kg
132 Tilapinnat			
Lattiapinnat:	8 CO ₂ eq kg / m ²	6734 m ²	50637 CO ₂ eq kg
Yhteensä:		6734 m ²	50637 CO ₂ eq kg
Koko rakennuksen hiilijalanjälki:			2727254 CO ₂ eq kg
Rakennuksen hiilijalanjälki per pinta-ala:			262 CO ₂ eq kg / m ²
Rakennuksen hiilijalanjälki per tilavuus:			75 CO ₂ eq kg / m ³

Liite 3 (1/1)

Rakenteelliset parannukset - energiasimulointi



RYM PRE-ohjelma

NewWoW

Asiakirja n:o

Projekti n:o

Pvm.

Laatija/Tark.

Viim. muutos

Laadittu

18.4.2013 jjp

PERUSTIEDOT:

Rakennuksen bruttoala: 9 696,1 brm²Rakennuksen tilavuus: 23 482,0 m³

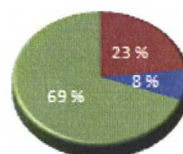
Simuloinnin kuvaus:

Tavoite-energiankulutus, Case 5, kaikki rakenteelliset parannukset

HUOM! Sisältää myös käyttäjänsähköön kulutuksen, joka ei ole mukana diplomityön tarkasteluissa

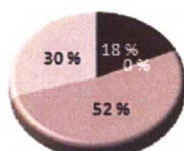
VUOTUIINEN ENERGIANTARVE

	MWh	kWh/m ²	kWh/m ³
Lämmitysenergia	213	22,0	9,1
Jäähdytysenergia	71	7,3	3,0
Sähköenergia yht.	640	66,0	27,2
-LVI, muu sähkö	94	9,7	4,0
-Valaistussähkö	260	26,8	11,1
-Laitesähkö	285	29,4	12,2



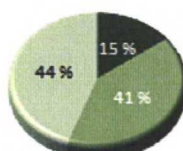
■ Lämmitysenergia
■ Jäähdytysenergia
■ Sähköenergia yht.

Lämmitysenergia



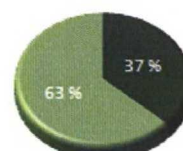
■ Lämmin käyttövesi
■ Lämmitys, muu
■ Lämmitys, tilat
■ Lämmitys, IV-koneet

Sähkö



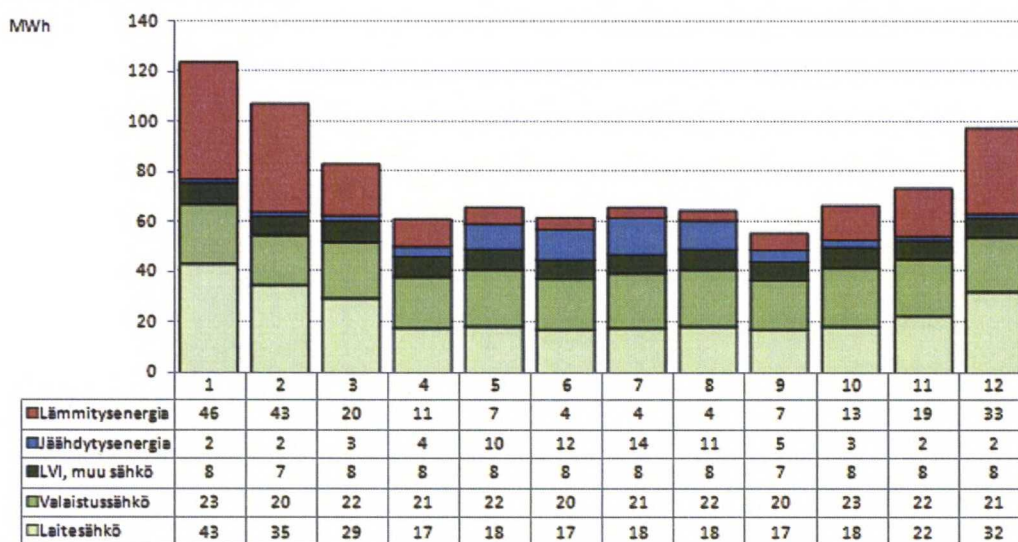
■ LVI, muu sähkö
■ Valaistussähkö
■ Laitesähkö

Kiinteistö- ja käyttäjänsähkö



■ Kiinteistönsähkö ■ Käyttäjänsähkö

KUUKAUSITTAINEN ENERGIANTARVE



Liite 4 (1/1)

Rak. parannukset - rakennusmateriaalit (mod. A1-A4)

121 Perustukset

Antura:	408 CO ₂ eq kg / m ³	230 m ³	94006 CO ₂ eq kg
Paalut250:	385 CO ₂ eq kg / m ³	114 m ³	43772 CO ₂ eq kg
Paalut300:	365 CO ₂ eq kg / m ³	207 m ³	75508 CO ₂ eq kg
Perustusseinät:	350 CO ₂ eq kg / m ³	171 m ³	59719 CO ₂ eq kg
Yhteensä:		722 m³	273006 CO₂eq kg

122 Alapohjat

AP 1:	89 CO ₂ eq kg / m ²	614 m ²	54393 CO ₂ eq kg
AP 2:	167 CO ₂ eq kg / m ²	2373 m ²	395296 CO ₂ eq kg
Pilarit:	372 CO ₂ eq kg / m ³	31 m ³	11493 CO ₂ eq kg
VP:	95 CO ₂ eq kg / m ²	4316 m ²	409689 CO ₂ eq kg
YP:	174 CO ₂ eq kg / m ²	3033 m ²	528280 CO ₂ eq kg
Yhteensä:		10367 m²	1399151 CO₂eq kg

124 Julkisivut

US:	110 CO ₂ eq kg / m ²	3951 m ²	435345 CO ₂ eq kg
Ikkunat:	27 CO ₂ eq kg / m ²	915 m ²	24975 CO ₂ eq kg
Yhteensä:		4866 m²	460319 CO₂eq kg

131 Tilan jako-osat

KS:	56 CO ₂ eq kg / m ²	2207 m ²	122779 CO ₂ eq kg
VS:	74 CO ₂ eq kg / m ²	6000 m ²	446432 CO ₂ eq kg
Yhteensä:		8208 m²	569211 CO₂eq kg

132 Tilapinnat

Lattiapinnat:	8 CO ₂ eq kg / m ²	6734 m ²	50637 CO ₂ eq kg
Yhteensä:		6734 m²	50637 CO₂eq kg

Koko rakennuksen hiilijalanjälki: 2752325 CO₂eq kg

Rakennuksen hiilijalanjälki per pinta-ala: 284 CO₂eq kg / m²

Rakennuksen hiilijalanjälki per tilavuus: 76 CO₂eq kg / m³

Liite 5 (1/1)

Valaistustehon pienentäminen - energiasimulointi


RAKENNUKSEN ENERGIASIMULOINTI
ENERGIANTARVE (NETTOTARVE)

RYM PRE-ohjelma

NewWoW

Asiakirja n:o

Projekti n:o

Pvm.

Laatija/Tark.

Viim. muutos

Laadittu

18.4.2013 jjp

PERUSTIEDOT:

Rakennuksen bruttoala: 9 696,1 brm²Rakennuksen tilavuus: 23 482,0 m³

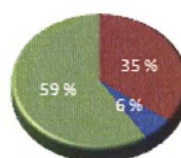
Simuloinnin kuvaus:

Tavoite-energiankulutus, Case 7, pienempi valaistusteho (10 W/m²)

HUOM! Sisältää myös käyttäjäsjähkön kulutuksen, joka ei ole mukana diplomityön tarkasteluissa

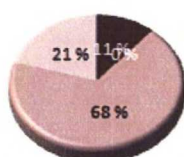
VUOTUINEN ENERGIANTARVE

	MWh	kWh/m ²	kWh/m ³
Lämmitysenergia	344	35,5	14,6
Jäähdytysenergia	56	5,8	2,4
Sähkötenergia yht.	576	59,4	24,5
-LVI, muu sähkö	94	9,7	4,0
-Valaistussähkö	196	20,2	8,4
-Laitesähkö	285	29,4	12,2



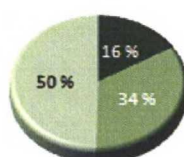
■ Lämmitysenergia
 ■ Jäähdytysenergia
 ■ Sähkötenergia yht.

Lämmitysenergia



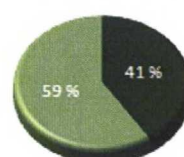
■ Lämmin käyttövesi
 ■ Lämmitys, muu
 ■ Lämmitys, tilat
 ■ Lämmitys, IV-koneet

Sähkö



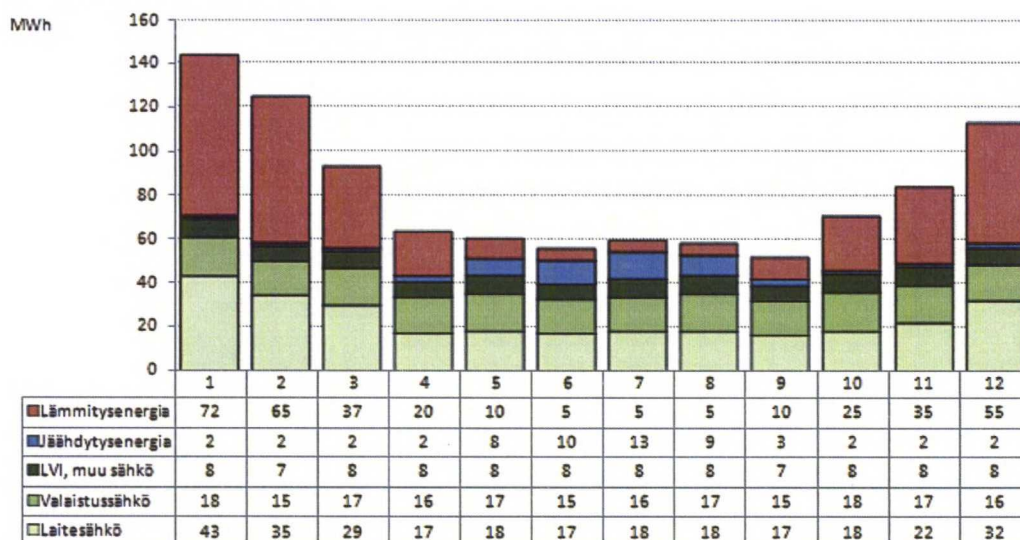
■ LVI, muu sähkö
 ■ Valaistussähkö
 ■ Laitesähkö

Kiinteistö- ja käyttäjäsjähkö



■ Kiinteistösjähkö ■ Käyttäjäsjähkö

KUUKAUSITTAINEN ENERGIANTARVE



Liite 6 (1/1)

Tarpeenmukainen ilmanvaihto - energiasimulointi


RAKENNUKSEN ENERGIASIMULOINTI
ENERGIANTARVE (NETTOTARVE)

RYM PRE-ohjelma

NewWoW

Asiakirja n:o

Projekti n:o

Pvm.

Lähtö/Tark.

Viim. muutos

Laadittu

18.4.2013 jip

PERUSTIEDOT:

Rakennuksen bruttoala: 9 696,1 brm²Rakennuksen tilavuus: 23 482,0 m³

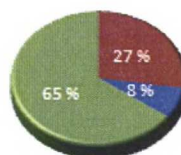
Simuloinnin kuvaus:

Tavoite-energiakulutus, Case 13, tarpeenmukainen IV

HUOM! Sisältää myös käyttäjäsiähkön kulutuksen, joka ei ole mukana diplomityön tarkasteluissa

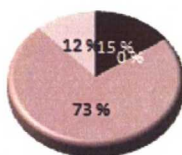
VUOTUINEN ENERGIANTARVE

	MWh	kWh/m ²	kWh/m ³
Lämmitysenergia	255	26,3	10,9
Jäähdytysenergia	72	7,4	3,1
Sähköenergia yht.	607	62,6	25,9
-LVI, muu sähkö	62	6,4	2,6
-Valaistussähkö	260	26,8	11,1
-Laitesähkö	285	29,4	12,2



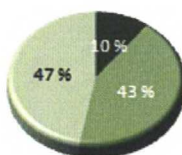
■ Lämmitysenergia
 ■ Jäähdytysenergia
 ■ Sähköenergia yht.

Lämmitysenergia



■ Lämmin käyttövesi
 ■ Lämmitys, muu
 ■ Lämmitys, tilat
 ■ Lämmitys, IV-koneet

Sähkö



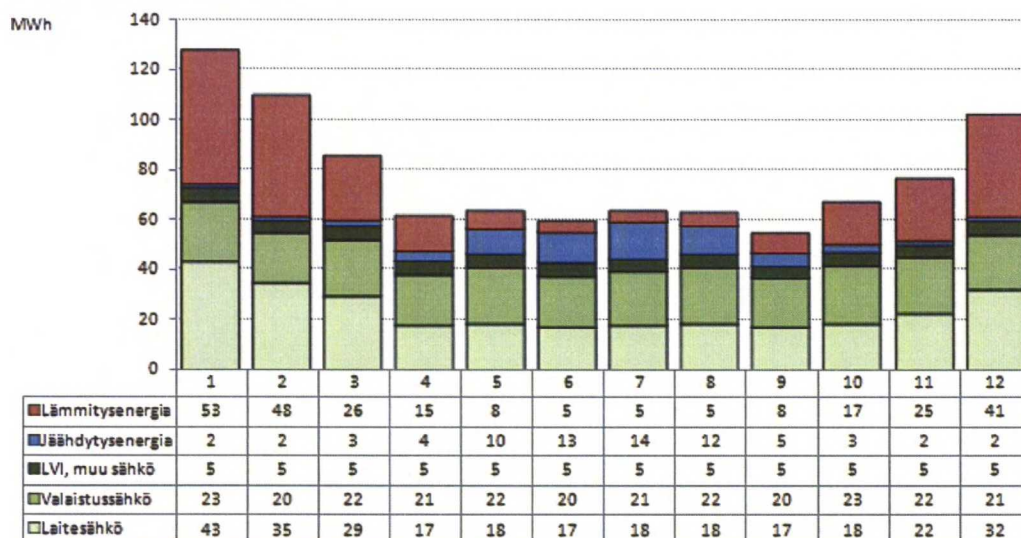
■ LVI, muu sähkö
 ■ Valaistussähkö
 ■ Laitesähkö

Kiinteistö- ja käyttäjäsi sähkö



■ Kiinteistösi sähkö ■ Käyttäjäsi sähkö

KUUKAUSITTAINEN ENERGIANTARVE



Liite 7 (1/1)

Useita parannuksia - energiasimulointi


RAKENNUKSEN ENERGIASIMULOINTI
ENERGIANTARVE (NETTOTARVE)

RYM PRE-ohjelma

NewWoW

Asiakirja n:o

Projekti n:o

Pvm.

Laatija/Tark.

Viim. muutos

Laadittu

18.4.2013 jjp

PERUSTIEDOT:

Rakennuksen bruttoala: 9 696,1 brm²Rakennuksen tilavuus: 23 482,0 m³

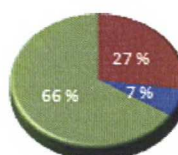
Simuloinnin kuvaus:

Tavoite-energiankulutus, Case 11, rakenteelliset parannukset, parempi IV ja pienempi valaistusteho

HUOM! Sisältää myös käyttäjäsähkön kulutuksen, joka ei ole mukana diplomityön tarkasteluissa

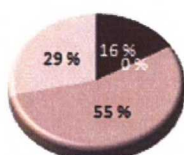
VUOTUINEN ENERGIANTARVE

	MWh	kWh/m ²	kWh/m ³
Lämmitysenergia	235	24,3	10,0
Jäähdytysenergia	61	6,2	2,6
Sähköenergia yht.	570	58,8	24,3
-LVI, muu sähkö	89	9,2	3,8
-Valaistussähkö	196	20,2	8,4
-Laitesähkö	285	29,4	12,2



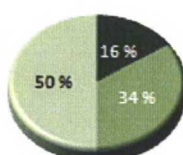
■ Lämmitysenergia
 ■ Jäähdytysenergia
 ■ Sähköenergia yht.

Lämmitysenergia



■ Lämmin käyttövesi
 ■ Lämmitys, muu
 ■ Lämmitys, tilat
 ■ Lämmitys, IV-koneet

Sähkö



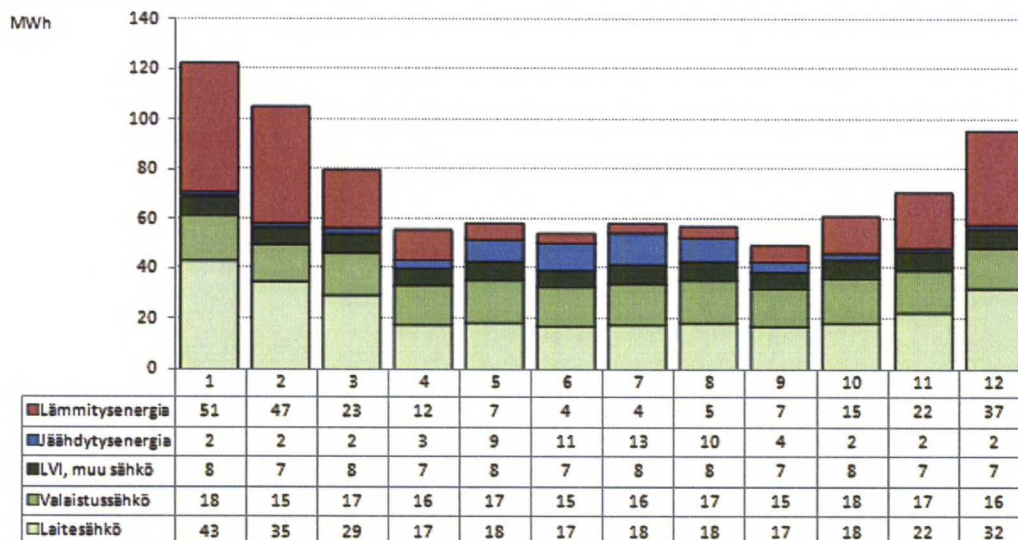
■ LVI, muu sähkö
 ■ Valaistussähkö
 ■ Laitesähkö

Kiinteistö- ja käyttäjäsähkö



■ Kiinteistösähkö ■ Käyttäjäsähkö

KUUKAUSITTAINEN ENERGIANTARVE



Liite 8 (1/1)

Maalämmön optimimitoitustehon laskenta

Maalämpöpumpun optimimitoitustehon laskentaa on käytetty hyödyksi RIUSKA energiasimulointiohjelmasta saatavaa Excel-tiedostoa, jossa on listattu rakennuksen lämmitystehontarve jokaiselle vuoden tunnille. Lämpimän käyttöveden kulutus on oletettu laskennoissa jakautuvan tasaisesti vuoden jokaiselle tunnille.

Investointikustannusten laskussa on käytetty Granlund Oy:n kokemuseräistä nyrkkiarvoa suurien kiinteistöjen maalämpöjärjestelmien investointikustannuksille, 1500 €/kW. Energiankulutuksen kustannusten netto nykyarvoa laskettaessa on käytetty 5 %:n nimelliskorkoa (r_n), 2 %:n inflaatiota (i) sekä 1 %:n eskalaatiota (e) sähkön hinnoille. Reaalikorko (r_r) ja myös eskalaation huomioon ottava, laskennoissa käytettävä korko r_e lasketaan seuraavasti.

$$r_r = \frac{r_n - i}{1 + i} = \frac{0,05 - 0,02}{1 + 0,02} = 0,0294$$

$$r_e = \frac{r_r - e}{1 + e} = \frac{0,0294 - 0,01}{1 + 0,01} = 0,0192 = 1,92 \%$$

Energian diskonttauskertoimeksi 50 vuoden käyttöajalla saadaan

$$\frac{(1 + r_e)^n - 1}{r_e * (1 + r_e)^n} = \frac{(1 + 0,0192)^{50} - 1}{0,0192 * (1 + 0,0192)^{50}} = 31,95.$$

Sähkön hinnaksi oletetaan 100 €/MWh, joka on usein käytännön projekteissa käytettävä nyrkkiarvo. Käyttämällä Excelin solver toimintoa saadaan näillä arvoilla maalämpöpumpun optimimitoitustehoksi laskentaosiossa käytetty 90,94 kW. Lämmityksen sähkön kulutus on tällöin yhteensä 121,7 MWh vuodessa. Luku sisältää sekä maalämpöjärjestelmän (vuosilämpökerroin 3,25) että sähkölämmityksen käyttämän sähkön. Maalämpöjärjestelmän investointikustannukset tällä mitoituksella ovat 136 400 €. Kokonaiskustannusten (investointi + energia) netto nykyarvoksi saadaan 525 300 €.